



**Уральский
федеральный
университет**

имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

**Физико-
технологический
институт**

**И. С. ЖИДКОВ
А. И. КУХАРЕНКО
С. О. ЧОЛАХ**

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Учебное пособие



Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

И. С. Жидков, А. И. Кухаренко, С. О. Чолах

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Учебное пособие

Рекомендовано методическим советом
Уральского федерального университета для студентов вуза,
обучающихся по направлениям подготовки
11.03.04, 11.04.04 — Электроника и нанoeлектроника

Екатеринбург
Уральский федеральный университет
2019

УДК 537-77: 537.57(075.8):53.06

ББК 22.33+31.244я73

Ж69

Рецензенты:

доц., канд. техн. наук *И. В. Бекетов* (завлабораторией импульсных процессов института электрофизики УрО РАН);

кафедра физики УГГУ (проф., д-р физ.-мат. наук *И. Г. Коршунов*)

Научный редактор — проф., д-р физ.-мат. наук *С. П. Никулин*

На обложке использовано изображение с сайта <https://is.gd/PcSe8J>

Жидков, И. С.

Ж69 Электрофизические методы обработки материалов : учебное пособие / И. С. Жидков, А. И. Кухаренко, С. О. Чолах. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019. — 195, [1] с.
ISBN 978-5-7996-2608-2

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям 11.03.04, 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника», аспирантов и научных работников.

В настоящем учебном пособии рассмотрены основные способы электрофизической обработки материалов, применяемые на практике. Изложены основные физические принципы работы электрофизических установок. Рассмотрены основы устройства электрофизических установок, представлены схемы типичных устройств для электрофизического воздействия. Рассмотрены некоторые области современной техники и конкретные технологии, где применяются высокое напряжение и ультракороткие импульсы.

Учебное пособие может быть использовано для студентов и аспирантов физических специальностей, в том числе по курсам «Электрофизические методы обработки материалов», «Актуальные проблемы современной электроники больших мощностей», «Импульсные процессы и импульсная техника».

Библиогр.: 10 назв. Рис. 58. Табл. 12.

УДК 537-77:537.57(075.8):53.06

ББК 22.33+31.244я73

ISBN 978-5-7996-2608-2

© Уральский федеральный университет, 2019

Введение

Более полутора веков отделяет нас от того времени, когда человек научился добывать и использовать в промышленности электрическую энергию. Прошрое столетие характеризуется всесторонним изучением свойств электрической энергии, разработкой промышленных способов ее производства, открытием способов ее применения. Результаты исследований в этой области оказались столь существенными, что утвердилось мнение о полной изученности свойств и возможностей этого нового вида энергии. Как следствие этого, первые десятилетия текущего столетия характеризуются лишь увеличением количества добываемой электрической энергии и всемерным развитием и использованием закономерностей, открытых в прошлом столетии (за исключением электроники в широком понимании этого термина).

В настоящее время на нашей планете ежегодно производится примерно 24000 млрд кВт·ч электроэнергии. И, тем не менее, во всех странах ведется упорная борьба за дальнейшее увеличение этого количества. В электрическую энергию перерабатывается громадное количество горючих ископаемых, энергия ветра, воды, лучистая энергия солнца и действие ряда химических процессов.

Подобное увеличение производства электрической энергии не случайно. Оно вызвано тем, что из всех известных ныне видов энергии электрическая энергия является наиболее удобной в использовании. В самом деле, возможность передачи ее на большие расстояния с весьма малыми потерями, просто-

та способов подведения больших мощностей непосредственно к месту потребления энергии, наконец, возможность с помощью весьма простых устройств превращать электрическую энергию во все другие виды энергии делают этот вид энергии в наш век незаменимым. Более того, едва ли в ближайшее десятилетие это положение изменится, поскольку известно, что ядерные реакции в энергетике могут быть использованы только через электрическую энергию.

Значительно сложнее решаются проблемы использования электрической энергии. Общеизвестно, что, начиная с прошлого столетия и по самое последнее время, подавляющая часть электрической энергии переформировалась в механическую. С ее помощью в движение приводятся бесчисленные станки и механизмы, транспорт, подъемные сооружения и многое другое.

Нынешнее столетие во всех странах характеризуется интересными особенностями перераспределения удельного расхода электрической энергии между различными потребителями. Является характерным то, что, наряду с абсолютным увеличением расхода электрической энергии, удельный расход ее на трансформацию в механическое движение все время падает. Одновременно с этим резко возрастает абсолютный и относительный расход электрической энергии на осуществление технологических процессов.

На рис. В.1 приведены данные по выработке электроэнергии по годам в России, Китае и США. Даны также прогнозы до 2030 года.

Технологические процессы, как у нас, так и за рубежом, в подавляющем большинстве случаев основаны на использовании открытий прошлого века и по своему существу в известной мере еще примитивны, поскольку используют наиболее простые свойства электрической энергии — способность ее превращаться в тепло или действие стационарного электрического поля (гальванические процессы, очистка газов, электрическая окраска изделий и др.). Однако даже с этими оговорками сле-

дует признать, что началось движение, темп которого все время нарастает, — по непосредственному использованию электрической энергии в технологических целях.

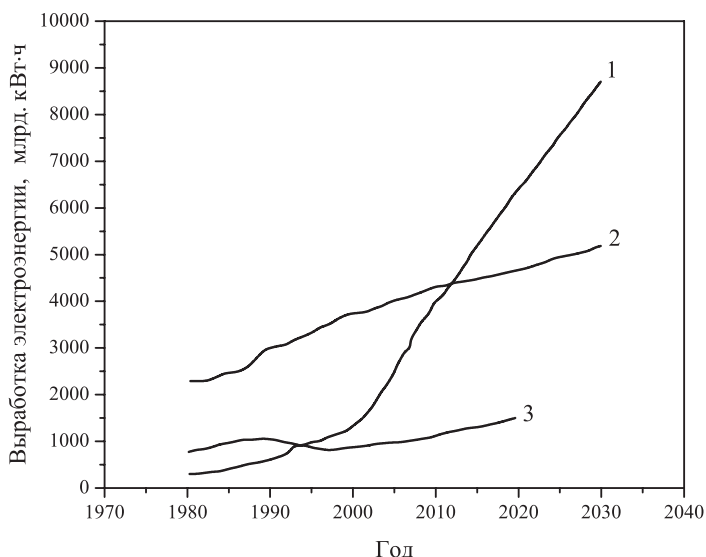


Рис. В.1. Выработка электроэнергии по годам с прогнозом до 2030 года:
1 — Китай, 2 — США, 3 — Россия

Выше указывалось, что даже сейчас более половины добываемой электрической энергии используется для получения механических усилий. Прошло уже более 100 лет, как появился первый электрический двигатель, т. е. машина, преобразующая электрическую энергию в механическое движение. На протяжении всего этого времени существующий электродвигатель, несмотря на ряд крупнейших недостатков, которыми он обладает, является единственным средством превращения электрической энергии в механическое движение. Даже сейчас, когда культура расчета и производства рассматриваемых электрических машин весьма высокая, двигатель обладает исключительно

большим весом на единицу мощности (10 кг/кВт). Электродвигатели обладают и другими недостатками: они дают возможность трансформировать электрическую энергию только во вращательное движение, для их изготовления требуется большое количество меди и др.

В конце XIX столетия произошло немаловажное событие в области обработки металлов: станки стали приводиться в движение при помощи электрической энергии. Однако, начиная с тех пор и до настоящего времени в представлении механиков по металлообработке электричество не является действующей силой — оно только источник этой силы, способной превращаться в механическую энергию, в видимое движение. Стремление приблизить энергию к зоне обработки заставило перейти на многомоторный привод отдельных кинематических звеньев. Создание фланцевых электродвигателей позволило просто решить эту задачу. Однако и в этом случае максимального приближения источника энергии к зоне ее реализации сама природа съема металла осталась прежней: это все те же механические усилия, при помощи которых снимается стружка с изделия. Стало очевидным, что дальнейшее приближение электрической энергии к месту обработки без изменения при этом самого существа процесса является невозможным. Поэтому логическим завершением описанного пути должно быть появление процесса принципиально нового качества, при котором съем металла с изделия осуществляется уже непосредственным освобождением самой электрической энергии. В этом случае процесс резания металлов перестает быть механическим и превращается в процесс электрический — электроискровой (электроэрозионный) способ обработки металлов, позволяющий при помощи электрических импульсов быстро и точно обрабатывать все токопроводящие материалы с любыми физическими и химическими свойствами.

Новая физическая природа этого процесса уже отрицает необходимость применения механических усилий. Электри-

чество уже не «источник» силы, оно само — сила. Оно само непосредственно взрывает и выбрасывает металл точно по заданному направлению. Оно производит работу. Все поменялось местами: электричество непосредственно обрабатывает металл, а «механика» выполняет вспомогательную подсобную роль.

Используемый здесь электрический импульс — типичный пучок электронов плазмы. Однако для осуществления электроискровой обработки необходим электрод, непосредственно обрабатывающий каждую точку заготовки. Поэтому должен был появиться новый способ, свободный от этого недостатка, способ, когда направление движения электронного пучка задается магнитным или электрическим полем. Такие способы появились — обработка электронным и световым лучом.

Появление и развитие электрофизических методов обработки материалов, использующих особые возможности электрической энергии (ее универсальность, пригодность для концентрации больших мощностей и легкая делимость на небольшие количества, способность превращаться в другие виды энергий), стало возможным только в современных условиях. Необходимая для этого теоретическая база и технические предпосылки создавались в течение двух веков работами многих ученых и инженеров.

Для последних лет характерен бурный процесс авиационной, ракетной, атомной и электронной техники, газотурбостроения, энергетического, общего, специального и химического машиностроения, металлургической, приборостроительной, электротехнической и инструментальной промышленности. Развитие этих отраслей вызвало резкое увеличение потребления жаропрочных, магнитных, нержавеющих, антикоррозионных и других высоколегированных сталей и твердых сплавов, полупроводниковых материалов, алмазов, рубинов, кварца, ферритов и многих других материалов, обработка которых обычными механическими методами затруднена или невозможна.

Современные конструкции машин, приборов и аппаратов требуют высокой точности изготовления деталей, которые не могут быть обработаны известными механическими методами, например, соединительные каналы в труднодоступных местах. В некоторых случаях необходимо изготовление деталей и изделий из малопластичных, трудно деформируемых металлов и сплавов, которые не могут быть изготовлены с помощью существующего механического оборудования.

Во всех указанных случаях, и в особенности при их сочетании, эффективно используются новые электрофизические методы обработки материалов. Эти методы, основанные на различных физико-химических процессах энергетического воздействия на твердое тело, позволяют осуществить обработку и формообразование материалов и получить изделие с заданной формой и размерами, но на другой технической основе и соответственно с другими, в ряде случаев, более широкими технологическими возможностями. В зависимости от используемого физического процесса новые методы обработки материалов могут быть условно разделены на следующие группы:

1. *Электроэрозионные* методы обработки токопроводящих материалов и сплавов основаны на использовании преобразуемой в тепло энергии импульсных электрических разрядов, возбуждаемых между инструментом и изделием. В зависимости от вида электрического разряда (искра, дуга), параметров импульсов тока, напряжения и других условий электроэрозионная обработка подразделяется на электроискровую, электроимпульсную, электроконтактную и анодно-механическую.

Каждой разновидности электроэрозионной обработки свойственны определенные технологические характеристики, оборудование и область промышленного применения.

2. *Магнитоимпульсная* обработка материалов основана на использовании энергии сильного импульсного магнитного поля. Она является новым технологическим направлением, которое не вышло из стен лабораторий, но перспективы которого очень

широки. Особо широкое применение магнитоимпульсная обработка найдет для формообразования малопластичных, трудно деформируемых материалов, для вырубки и штамповки и осуществления многих оборотных операций.

3. *Лучевые* методы обработки используются для обработки токопроводящих материалов и диэлектриков. Они основаны на съеме материала при воздействии на него сфокусированными лучами с высокой плотностью энергии. Съем материала осуществляется преобразованием этой энергии непосредственно в зоне обработки в тепло.

К лучевым методам относится обработка световым, электронным и ионным лучами.

4. *Ультразвуковой* метод обработки является методом механического воздействия на материал. Он назван ультразвуковым благодаря тому, что частота ударов соответствует диапазону неслышимых звуков выше 16 кГц. Ультразвуковым методом могут обрабатываться твердые и хрупкие материалы, частицы которых могут как бы выкалываться при ударе. Известны технологические процессы, основанные на других свойствах высокочастотных упругих механических колебаний.

Глава 1. Электрический взрыв в конденсированных средах

В электробалансе страны на долю электротехнологии приходится около 15 % потребляемой электроэнергии, причем неуклонное развитие науки и техники ведет к непрерывному росту этой доли, вызывает к жизни все новые электротехнологические процессы. Уже нашли широкое применение или представляются перспективными многие электрофизические методы обработки и разрушения материалов, среди которых широко известны электроэрозионные, плазменные, электролучевые и другие. Часть этих методов основана преимущественно на тепловом воздействии электрического тока, часть на механическом. Среди последних можно выделить группу методов, в основе которых лежит электровзрывное воздействие на объект.

Известно, что взрыв — крайне быстрое выделение энергии, связанное с внешним изменением состояния вещества, как правило, сопровождаемое разбрасыванием или разрушением окружающей среды, образованием в среде особого рода возмущения — ударной или взрывной волны, переходом начальной энергии в энергию движения вещества. В том случае, когда начальным видом энергии является электрическая энергия, это явление можно классифицировать как электровзрыв.

При искровом разряде или при разряде через проводник достаточно малого сечения электрическая энергия, переходя в тепло окружающей среды или испаренного металла, может дать явление электрического взрыва.

В настоящем разделе рассматриваются теория, техника и технологические аспекты электрического взрыва в конденсированных средах (жидкостях, твердых диэлектриках и полупроводниках). Методы электротехнологии, использующие в основе электровзрыв в конденсированной среде, до сих пор не имеют общепринятой терминологии и классификации. Для описания явлений, сопровождающих расширение искрового канала в жидкостях, а также в сферах, практически применяющих это явление, пользуются термином «электрогидравлический эффект» (и соответственно электрогидравлические методы, электрогидравлическая технология).

Для обозначения метода, использующего искровой разряд в твердом диэлектрике, чаще всего используют термин «электроимпульсный метод» (электроимпульсная технология), к сожалению, совпадающий с обозначением одной из разновидностей электроэрозионной обработки материалов.

Представляется наиболее трудным наименование метода, при котором превращение электрической энергии в энергию взрыва обеспечивается с помощью металлической вставки, претерпевающей взрывоподобные фазовые превращения в результате быстрого выделения в ней джоулева тепла.

Физика явления электрического взрыва проводника (ЭВП) своеобразна и, видимо, целесообразно выделить технологию, основанную на нем, в отдельный вид. Далее такая технология будет именоваться как электровзрывная с использованием ЭВП.

Следует принять к сведению также термин «разрядно-импульсная технология», используемый часто для обозначения всех разновидностей электровзрыва.

Таким образом, электровзрывную (разрядно-импульсную) технологию можно подразделить на электрогидравлическую, электроимпульсную, электровзрывную с использованием ЭВП.

Тот факт, что разряд в жидкости может обладать разрушительной силой, отмечен в XV веке, однако первые предложе-

ния по практическому применению разряда в жидкости сделаны в 30–40-х гг. XX в. Активная пропаганда применения этого явления Л. А. Юткиным и его многочисленные предположения по использованию импульсных электрических разрядов в воде способствовали постановке исследовательских работ по совершенствованию таких распространенных технологических процессов, как штамповка, очистка литья, диспергирование металлов, и др.

Начиная с 50-х гг. XX в. в нашей стране началось использование электрогидравлической технологии в промышленности, к настоящему времени освоен серийный выпуск ряда моделей установок по очистке литья, штамповки.

В 60–70-х гг. XX в. широко развернуты работы по поиску новых областей применения электрогидравлической технологии в машиностроении (калибровка, упрочнение, снятие остаточных напряжений в конструкциях и др.), металлургии (прессование, очистка деталей от окалины, регенерация формовочных и стержневых смесей и многое другое), в горной промышленности (геолого-разведочные работы, измельчение руд и т. д.), нефтяной и газовой (бурение скважин, разглинизация и декольмотация скважин, обогащение руд), в химической (пиролиз жидких углеводородов, полимеризация веществ), в строительной (уплотнение грунта, активизация растворов, цемента и т. д.).

Широкий спектр возможных сочетаний условий протекания процесса со свойствами и характеристиками объекта воздействия создает исключительные перспективы для поиска новых полезных применений электрогидравлической технологии.

Первые полезные применения импульсного пробоя твердых диэлектриков предложены в нашей стране в конце 50-х гг. XX в. для разрушения малопрочных пород (глинистых сланцев, углей), имеющих также достаточно низкую электрическую прочность. Однако только после разработки эффективных способов инициирования разряда в толще крепких пород и руд, проведенной А. А. Воробьевым и его сотрудниками, появилась

возможность для широкого наращивания работ по исследованию возможности электроимпульсной технологии.

Объектами электроимпульсной технологии, за редким исключением, являются непосредственно твердые образования, подверженные пробоем и относящиеся по проводимости к диэлектрикам, либо к полупроводникам, т. е. обладающие высоким удельным электрическим сопротивлением, достаточным для формирования канала электрического пробоя. Чаще всего целью применения электровзрыва в толще твердого тела является разрушение, диспергирование материала.

К настоящему времени развернуты работы по исследованию возможностей электроимпульсной технологии применительно к горной промышленности (бурение скважин, измельчение руд, отбойка камня, разрушение негабаритов), в строительной (разрушение некондиционных железобетонных изделий, приготовление дорожных покрытий и т. д.) и некоторых других.

Промышленностью осваивается дробильно-измельчительный комплекс для дезинтеграции геологических проб.

ЭВП по сравнению с искровым разрядом при равных возможностях электрооборудования позволяет достичь больших пиковых воздействий, увеличения КПД перехода электрической энергии в энергию взрыва и дает, кроме того, ряд технологических преимуществ.

Однако возможности применения электровзрывной технологии с использованием ЭВП весьма ограничены вследствие ряда недостатков, присущих ей: сложность автоматизации процесса при большой частоте следования импульсов, расход металла, загрязнение окружающей среды продуктами разложения металлической вставки. В этой связи такая технология нашла пока ограниченное применение (развальцовка трубчатых изделий, взрывание негабаритов и т. д.) и, главным образом, при использовании однократных актов воздействия.

Кроме указанных областей, электровзрыв в конденсированных средах представляет определенный интерес в научном

эксперименте. Здесь искровой канал либо электрически взрываемый проводник интересны как источники света высокой яркости и регулируемой геометрии, как генераторы широко варьируемых параметров с точной временной привязкой.

Метание тел, создание кумулятивных струй, работа в режиме оптических затворов, источников звука, моделирование взрывов, в том числе многозарядных — далеко не полный перечень операций, которые можно осуществить с помощью электровзрыва.

Для того чтобы представить круг вопросов, предлагаемых для изучения в настоящем разделе, рассмотрим простейшую функциональную схему устройства, предназначенного для осуществления электровзрыва с целью получения технологического эффекта.

На рис. 1.1 приведены схемы, характерные для электрогидравлической (а) и электроимпульсной (б) технологии.

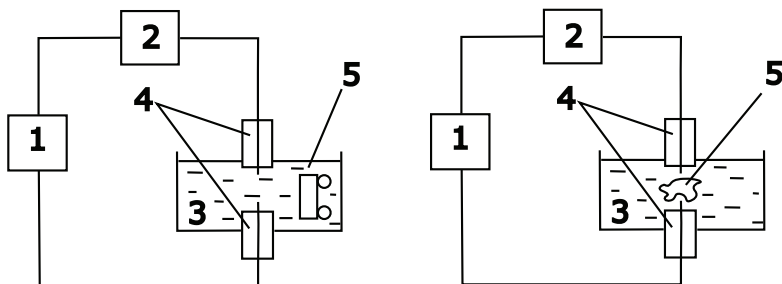


Рис. 1.1. Схемы электрогидравлической — а
и электроимпульсной технологии — б:

- 1 — генератор высоковольтных импульсов (ГВИ), 2 — коммутатор (К),
3 — рабочая (разрядная) камера, заполненная жидкостью,
4 — электродная система, 5 — объект технологии

При этом наблюдается следующая последовательность явлений и процессов в каждом единичном акте работы для схемы (а): накопление электрической энергии в накопителях ГВИ,

коммутация К, рост напряжения на межэлектродном рабочем промежутке и формирование (инициирование) канала сквозной проводимости, трансформация электрической энергии накопителей ГВИ во внутреннюю энергию продуктов искрового канала, расширение искрового канала с последующим его вырождением в газовую полость, претерпевающую несколько затухающих пульсаций, формирование в жидкости переменного во времени и пространстве поля давлений и массовых скоростей, взаимодействие этого поля с объектом, создание в нем напряженного состояния с пластическим течением (изменением формы) либо ростом трещин (разрушением).

Приведенная последовательность является упрощенной и не отражает ряд побочных, но иногда важных явлений, например, передачу тепла от искрового канала путем различных механизмов теплопроводности, приэлектродные процессы и т. д. Кроме того, перечисленная цепь не является строго последовательной во времени, так, например, процесс энерговыделения в искровом канале идет параллельно с формированием волны сжатия в окружающей жидкости, а иногда и преобразованиями объекта.

Для электроимпульсной технологии, использующей электровзрыв в толще твердого диэлектрика (объекта), расширение искрового канала ведет непосредственно к созданию напряженного состояния в объекте, зарождению и росту трещин, истечению продуктов канала в окружающую среду (жидкость или газ), а также в полости разломов.

Электровзрывная технология с использованием ЭВП, хотя и может быть рассмотрена на примере работы устройств, показанных на рис. 1.1, имеет, тем не менее, существенные особенности. Металлическая вставка, замыкающая электроды, исключает стадию формирования проводящей перемычки между электродами, но, с другой стороны, определенный период времени аккумулирует энергию накопителей ГВИ практически без обмена с окружающей средой; на заключительном этапе фазо-

вых превращений вещества вставки происходит бурное расширение продуктов взрыва. ЭВП — весьма сложный быстропротекающий процесс, характеризующийся высокой скоростью термодинамических и фазовых преобразований вещества, и интенсивными возмущениями от окружающей среды.

Учитывая достаточно сложную картину всей совокупности явлений, происходящих при электровзрыве, представляется естественным его изучение по отдельным стадиям.

Вначале нами будет рассмотрена техника и приемы инициирования разрядов в жидких и твердых диэлектриках. В этом разделе, ориентируясь на знания, полученные студентами по физике диэлектриков, способы инициирования анализируются главным образом с точки зрения их технологичности и эффективности при последующем преобразовании выделенной в канале пробоя электрической энергии в работу над окружающей средой. Основным приемом инициирования является пробой межэлектродного промежутка в электрической или электротепловой форме. Для уменьшения пробивных градиентов напряжения, локализации токопроводящего канала, достижения определенной конфигурации его и снижения затрат энергии на инициирование в промежуток часто вводят различные диэлектрические или металлические инородности. Иногда целесообразно для инициирования применять специальные вспомогательные источники электрических сигналов, синхронизированные с основным накопителем ГВИ.

Мы проанализируем составляющие энергетического баланса при электровзрыве в конденсированных средах на стадии выделения в канале разряда электрической энергии. Здесь показано, что в области параметров и характеристик технологического электровзрыва природа расширения разрядного канала носит гидродинамический характер, при этом магнитным давлением и поступлением частиц из окружающей среды как возможными причинами изменения радиальной геометрии канала, в первом приближении, можно пренебречь.

Анализируя термодинамические свойства вещества в канале разряда и закономерности выделения энергии в нем, обоснованы аналитические выражения для отдельных компонент в уравнении энергетического баланса, при этом показано, что в большинстве случаев потерями энергии, уносимой из канала с излучением и путем теплопроводности, можно пренебречь. Таким образом, разрядный канал как источник импульсных механических нагрузок в конденсированной среде может рассматриваться как полость, расширяющаяся под действием избыточного давления, существующего в нем.

Далее будут рассмотрены теоретические аспекты расширения таких полостей в конденсированных средах. Приводится математический аппарат, используемый при постановке задач по расширению полостей в жидкости и сплошной среде. В качестве примеров рассмотрены задачи о расширении сферической и цилиндрической полостей в жидкости в приближении несжимаемой среды, в акустическом приближении и сферической полости в упругой среде.

Глава 2. Способы инициирования электрических разрядов

2.1. Инициирование разряда в жидкостях при электрической форме пробоя

Для электрической формы пробоя конденсированных диэлектриков характерны следующие закономерности:

1. Развитие ионизации в толще диэлектрика предшествует фазовым превращениям вещества.

2. Разряд развивается с высокой скоростью, достигающей 10^7 см/с и более.

3. Разрядные характеристики зависят от тех физико-химических свойств диэлектриков (плотности, длины молекулярных цепей, диэлектрической проницаемости, кристаллографического направления), которые влияют на электродные процессы, в частности, на эмиссию, автоионизацию, ускорение электронов до ионизационных энергий.

4. Отсутствуют ярко выраженные снижения электрической прочности с ростом температуры, вплоть до температуры фазового превращения, и с ростом проводимости диэлектрика.

Если рассматривать электрический пробой как способ инициирования в межэлектродном промежутке ионизированного токопроводящего канала, следует отметить, что такой способ имеет определенные достоинства:

- а) характеризуется весьма малыми энергетическими затратами;

б) не вносит существенных возмущений плотности в окружающую среду на стадии развития предпробивных процессов.

Последнее важно, ибо на следующей стадии — стадии расширения искрового канала, при формировании волны давления демпфирующее влияние на нее со стороны указанных возмущений невелико.

Основным недостатком инициирования разряда электрическим пробоем является необходимость обеспечения высоких электрических градиентов в разрядном промежутке, соответственно, электрооборудование должно обеспечить напряжение в несколько десятков киловольт при пробое технической воды и до 200—300 кВ при пробое диэлектрических жидкостей.

Для электровзрыва наиболее часто используется техническая вода, в отдельных случаях вода, подготовленная специальным образом (конденсаты, растворы солей и т. д.), реже жидкие углеводороды, силиконовые масла, глицерин, расплавы солей.

Импульсная электрическая прочность всех перечисленных жидкостей выше, а иногда значительно, чем статическая прочность на постоянном напряжении, однако при инициировании электровзрыва обычно используют импульсы напряжения, ибо только в этом случае в реальных жидкостях удастся добиться электрической формы пробоя и избежать больших энергозатрат на формирование искрового канала.

В табл. 2.1 приведены экспозиции напряжения, при которых реализуется электрический (лидерный) механизм пробоя жидкостей с различной электропроводностью σ .

При временах больших, чем указанные в табл. 2.1, имеет место электротепловой механизм пробоя, ионизация газовой фазы, формирующейся в промежутке.

Конечно, границы между этими формами пробоя достаточно условны и определены лишь по порядку параметра. Не исключено существование достаточно широкого диапазона условий (градиентов напряжения, свойств жидкости), когда в промежутке одновременно проявляются элементы как тепловой, так

и электрической формы пробоя, т. е. и ионизационные процессы протекают параллельно как в толще жидкости, так и в газовой фазе, предварительно возникающей в жидкости.

Таблица 2.1

Класс жидкостей	σ , Ом ⁻¹ ·см ⁻¹	Предельная экспозиция напряжения, с
Диэлектрические спектрально чистые	10^{-14} — 10^{-18}	Любая, включая постоянные напряжения
Диэлектрические технически чистые	10^{-9} — 10^{-13}	$(5-10) \cdot 10^{-4}$
Очищенная вода	10^{-5} — 10^{-7}	$(1-10) \cdot 10^{-5}$
Водные электролиты	10^{-2} — 10^{-4}	$(0,5-5) \cdot 10^{-7}$

Более того, в научной литературе существует мнение, что пробой жидкостей всегда осуществляется за счет ионизации газовых образований. Тем не менее, многочисленные экспериментальные факты свидетельствуют о том, что закономерности электрического пробоя, указанные выше, выполняются при достаточно малых экспозициях напряжения, даже для водных электролитов с $\sigma = 10^{-2}$ Ом⁻¹·см⁻¹.

Обобщая результаты экспериментального исследования развития разряда в области микросекундных длительностей импульсов, В. Я. Ушаков дает следующее качественное описание предпробивным явлениям.

Разряд происходит в форме лидерного процесса, имеющего две существенно различные стадии развития. Первая стадия — непрерывное развитие со скоростью 10^5 — 10^7 см/с от электрода в глубь промежутка контрагированных первичных каналов диаметром 1—5 мкм; это сопровождается протеканием токов $\sim 10^{-3}$ — 10^{-4} А с плотностями $(1-8) \cdot 10^3$ А/см² и средними продольными градиентами потенциала $(1,5-1,8) \cdot 10^4$ В/см. Удельная проводимость вещества первичного канала — 0,1—0,8 Ом⁻¹·см⁻¹. В про-

цессе развития первичного канала в его основании создаются некоторые критические условия, связанные с повышением температуры и давления, приводящие к ударному расширению канала со скоростью $(1-6) \cdot 10^5$ см/с до 50–100 мкм, увеличению тока на 3–4 порядка, яркой вспышке канала. Преобразование первичного канала, представляющее вторую стадию лидерного процесса, от основания первичного канала распространяется к его головке со скоростью $(1-3) \cdot 10^7$ см/с. Этим заканчивается первая ступень толчкообразного развития лидерного канала с продольными градиентами потенциала 2–8 кВ/см и удельной проводимостью вещества 2–10 Ом⁻¹·см⁻¹. В последующем первичный канал развивается с головки лидерного канала и его преобразование в лидерный осуществляется аналогично описанному. Скорость развития первичного канала, паузы между толчками лидера и, следовательно, эффективная скорость удлинения лидерного канала зависят от свойств жидкости и параметров импульса напряжения. Эти факторы, а также геометрия разрядного промежутка и определяют в основном пробивные градиенты при инициировании токопроводящего канала электрическим пробоем. Рассмотрим последовательно влияние указанных факторов и пути снижения рабочих напряжений при инициировании электрическим пробоем.

Геометрия разрядного промежутка

Главным условием, определяющим зажигание и развитие разряда в межэлектродном промежутке, является достижение необходимых, достаточно высоких градиентов напряжения. Стремление ограничить уровень используемых напряжений требует применения электродных систем, обеспечивающих высокую степень неоднородности электрического поля в разрядном промежутке. Примерами таких систем являются «острие-плоскость» или «острие-острие» Напряженность поля у острия с радиусом r кривизны, намного меньшим длины l межэлектродного промежутка, можно найти по приближенной формуле

$$E \approx \frac{2U}{r \cdot \ln\left(\frac{4l}{r}\right)} \quad (2.1)$$

для электродов типа «острие-плоскость» и по формуле

$$E \approx \frac{U}{r \cdot \ln\left(\frac{2l}{r}\right)}, \quad (2.2)$$

для электродов типа «острие-острие».

Эти формулы показывают, что максимальная напряженность в промежутке определяется главным образом радиусом кривизны острия и напряжением U . Геометрия реальных электродов в той или иной технологии при инициировании токопроводящего канала электрическим пробоем, кроме указанных выше соображений, выбирается также из условий обеспечения стойкости электродных систем к воздействию электрической эрозии и механических нагрузок, из условий концентрации давлений (механических напряжений) в требуемом сечении или объеме и некоторых других условий. Тем не менее, для снижения уровня рабочих напряжений практически всегда следует использовать представляемые возможности для увеличения степени неоднородности электрического поля.

Параметры воздействующего импульса напряжения

Для электрического пробоя изоляционного промежутка характерно явление запаздывания. Основной закономерностью, определяющей влияние параметров импульса напряжения на электрический пробой жидкостей, является снижение пробивных градиентов при увеличении экспозиции напряжения. На рис. 2.1 приведены стилизованные вольт-секундные характеристики пробоя промежутка «стержень-плоскость» на фронте экспоненциальных импульсов. Форма импульса напряжения, воздействующего на промежуток, в определенной степени так-

же влияет на уровень пробивного напряжения. Чем ближе форма к прямоугольной, тем ниже этот уровень при равных экспозициях (временах до пробоя). Так, в области микросекундных экспозиций пробивные напряжения конденсированных диэлектриков для промежутков «стержень-плоскость» сантиметрового диапазона на прямоугольных импульсах на 30–40 % ниже, чем на косоугольных.

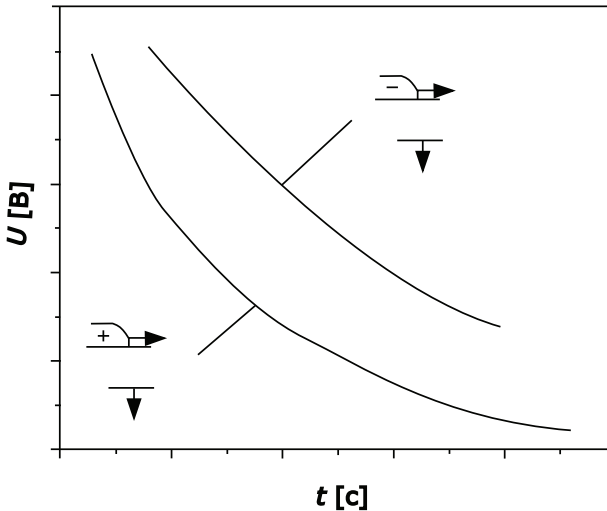


Рис. 2.1. Стилизованные вольт-секундные характеристики пробоя промежутка «стержень-плоскость»

Известно, что для ряда жидкостей, особенно сильнополярных (например, воды), имеет место существенный «эффект полярности», т. е. в межэлектродном промежутке, образованном электродами с различным радиусом кривизны, пробивное напряжение ниже при положительной полярности электрода с меньшим радиусом. Если один электрод заземлен, то даже при одинаковой геометрии электрода за счет экранирующего действия заземленных элементов конфигурация поля несим-

метрична. Используя эти факты, для инициирования предпочитают импульсы положительной полярности.

Свойства жидкости

Не акцентируя внимания на том, каким образом природа жидкости (например, химический состав) влияет на ее электрическую прочность, рассмотрим лишь один, но важнейший для технологии электровзрыва аспект: электропроводность жидкости и ее электрический пробой.

Несмотря на то, что для электрической формы пробоя характерна слабая зависимость пробивных градиентов от электропроводности среды, тем не менее для жидкостей с высокой электропроводностью (вода, глицерин, спирты и др.) процесс пробоя даже в области очень малых экспозиций (10^{-6} - 10^{-7} с) существенно зависит от σ . Возможно это связано с тем, что для таких жидкостей электрической формы пробоя в чистом виде не существует.

В области высоких проводимостей ($\sigma > 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$) существенное значение имеет растекание импульсных токов в жидкости как с электродов, так и с поверхности плазменных образований, формируемых в промежутке в процессе пробоя. С одной стороны, это приводит к значительным потерям энергии в разрядном промежутке на стадии формирования канала пробоя, с другой стороны, локально меняет свойства и характеристики жидкости (температуру, проводимость и др.) вплоть до фазовых превращений. В этой связи важной для протекания предпробивных процессов оказывается площадь контакта металлических элементов электрода с жидкостью. Для снижения предпробивных потерь один из электродов (обычно высоковольтный) выполняют изолированным на большей части от жидкости (обычно воды), для чего используют различные пластические массы, резину, реже фарфор. За счет осаждения зарядов на поверхности изоляции, обращенной к жидкости, происходит искажение электрического поля и формирование частичных разрядов

на границе раздела металл-изоляция, что ведет к разрушению изоляции, ограничению ресурса работы электрода. Стремясь избежать этого, увеличивают оголенную часть электрода, т.е. допускают определенные потери энергии.

Известны эмпирические формулы для предельного промежутка «стержень-плоскость», который может быть подвергнут пробой при определенных затратах энергии в пробивной стадии.

Так, допуская 10%-ные потери в воде,

$$l \leq \sqrt{\frac{0,035 \cdot C(U - U_0)^2}{\sqrt{S} \cdot a \cdot \sigma}} + 1,25^2 - 1,25, \text{ [см]}, \quad (2.3)$$

где U — исходное напряжение на зажимах накопителя, $U_0 = 18 \cdot 10^3 \cdot \ln(4l/r)$ — напряжение, соответствующее минимальной напряженности поля, при которой еще возникают лидеры (36 кВ/см); a — константа, равная $3600 \text{ с} \cdot \text{В}^2/\text{см}$, S — площадь оголенной поверхности высоковольтного электрода, см^2 , C — емкость генератора, Φ .

Пределы применения (3): $U = 15\text{--}100 \text{ кВ}$, $C = 0,1\text{--}10 \text{ мкФ}$, $S = 0,8\text{--}4 \text{ см}^2$, $r = 0,5\text{--}4,0 \text{ мм}$, $\sigma \sim 10^{-4} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$.

Попутно отметим, что при

$$l \geq \sqrt{\frac{2,5C \cdot U_0^2 \left(\frac{U^2}{U_0^2} - 4 \frac{U}{U_0} + \ln \left(12 \frac{U^2}{U_0^2} \right) \right)}{4\sqrt{\pi S} \cdot \sigma \cdot a}} + 1,25^2 - 1,25, \text{ [см]}, \quad (2.4)$$

пробой с образованием канала сквозной проводимости вообще не наблюдается.

С ростом электропроводности от 10^{-4} до $10^{-2} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ветвистость каналов неполного пробоя резко возрастает, нарастает объем жидкости, подвергаемой фазовому превращению. В таких условиях электрический пробой возможен либо при резком снижении экспозиций до $10^{-7}\text{--}10^{-6} \text{ с}$, что требует очень больших

средних рабочих градиентов (~ 100 кВ/см), либо за счет использования генераторов с большим энергосодержанием, покрывающим большие предпробивные потери.

По первому пути идут, например, при электроимпульсном измельчении рудных и нерудных материалов, применяя промежутки 10–40 мм при напряжениях 200–300 кВ; по второму, например, при электрогидравлической штамповке крупногабаритных изделий, применяя $W \sim 105$ Дж, $U \sim 50$ кВ, $l \sim 50$ мм. При $\sigma > 10^{-2}$ Ом $^{-1}$ ·см $^{-1}$ и ограниченном уровне напряжения ($U < 50$ кВ) предпочтительнее становится электротепловой пробой.

Следует отметить, что инициирование искрового канала в жидкости путем электрического пробоя — эффективный способ, отличающийся высокой стабильностью, но требующий весьма высоких градиентов напряжения (и, следовательно, напряжения) в слабо проводящих жидкостях вследствие их высокой электрической прочности, в сильно проводящих (например, вода) для ограничения предпробивных потерь. Соответственно, если ограничиться каким-либо уровнем напряжения, например, из технологических соображений, техники безопасности, то можно утверждать, что электрический пробой позволяет инициировать лишь искровые каналы ограниченной длины вследствие причин, указанных выше. Например, эффективное инициирование в технической воде ($\sigma \sim 10^{-4}$ Ом $^{-1}$ ·см $^{-1}$) можно произвести лишь при /меньшем в 1,5–2 раза, чем определенном по формуле (2.4).

2.2. Инициирование разряда в твердых диэлектриках при электрической форме пробоя

Применение электровзрыва в толще твердых диэлектриков наиболее эффективно для разрушения крепких и сверхкрепких минеральных образований: горных пород, руд, где тра-

диционные методы механического воздействия не позволяют получить высокую производительность либо требуемый технологический эффект. Физико-механические характеристики у таких материалов находятся в достаточно сильной корреляции с электрической прочностью. Для иллюстрации этого факта на рис. 2.2 приведены вольт-секундные характеристики некоторых горных пород, а в табл. 2.2 их физико-механические свойства.

Наиболее прочные минералы, породы имеют электрическую прочность, не уступающую лучшим изоляционным материалам, что требует для инициирования разряда в них применения исключительно высоких для технологии напряжений.

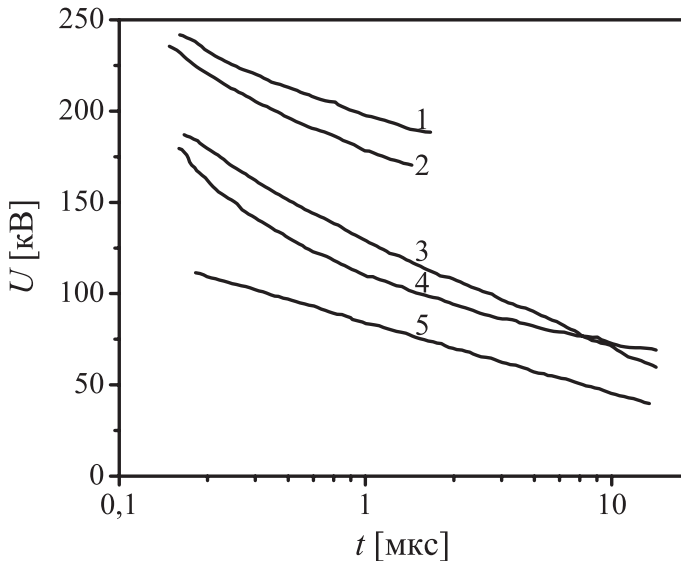


Рис. 2.2. Вольт-секундные характеристики пробоя горных пород в электрическом поле «стержень-плоскость» на импульсах положительной полярности:

1 — кварцит, 2 — фельзит-порфир, 3 — мрамор, 4 — глинистый сланец, 5 — песчаник. Расстояние между электродами 10 мм.

Таблица 2.2

Горная порода	Контактная прочность, кг/мм ²	Пористость, %	Временное сопротивление сжатию, кг/см ²	Коэффициент крепости по шкале Протодьяконова
Кварцит	290	1	3900	20
Фельзит-порфир	250	1,3	3200	15
Мрамор	105,6	1,89	1050	8
Глинистый сланец	65	20,4	150	5
Песчаник	63,5	7,5	560	6

Не менее важной проблемой инициирования разряда в твердых диэлектриках является соотношение напряжений пробоя твердого тела, окружающей среды и напряжения перекрытия по границе их раздела.

Естественно, что из технологических соображений окружающая среда может быть либо жидкостью, либо газом.

На рис. 2.3 приведены типичные варианты расположения электродов относительно разрушающего диэлектрика.

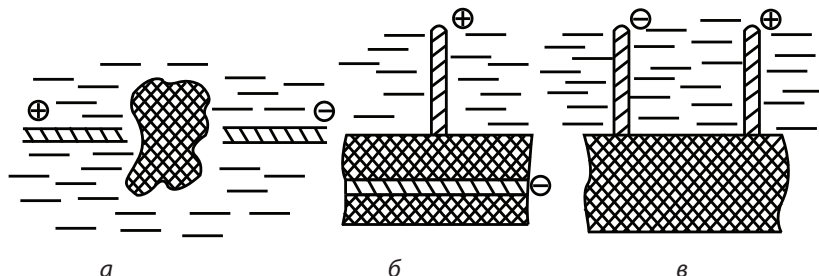


Рис. 2.3. Типичные варианты расположения электродов относительно разрушающего диэлектрика:

а — операция диспергирования материалов, *б* — разрушение некондиционных железобетонных изделий, *в* — проходка горных выработок

Случай *a* характерен для операции диспергирования материалов, *б* — разрушения некондиционных железобетонных изделий, *в* — проходки горных выработок. Вероятность пробоя твердой компоненты в каждом из этих случаев зависит от сочетания свойств твердого диэлектрика и окружающей среды (электрической прочности, диэлектрической проницаемости и др.), параметров воздействующего сигнала, состояния поверхности раздела, конфигурации электродов и т. д.

Из практики применения твердой, жидкой и газообразной изоляции известно, что твердые диэлектрики в большинстве сочетаний условий работы, в том числе на постоянном токе и промышленной частоте, обладают наилучшими изоляционными свойствами, характеризуются наибольшими рабочими градиентами напряжения.

Поэтому для формирования канала пробоя в толще твердых диэлектриков, окруженных жидкостью (реже газом), используют специальные сочетания условий, отдельные явления и закономерности. Перечислим основные из них.

1. Относительное снижение пробивных градиентов поля у твердых диэлектриков по сравнению с жидкостями и газами в области малых экспозиций напряжения (10^{-7} – 10^{-6} с).

2. Аномальное снижение импульсной электрической прочности твердых диэлектриков в области крутизны косоугольного импульса 30 кВ/мкс, не совпадающее по экспозиции с аналогичными явлениями в жидкостях и газах.

3. Прогрессирующее снижение разрядных градиентов у твердых диэлектриков в резко неоднородном поле с ростом межэлектродного промежутка.

4. Сочетание нормального эффекта полярности у твердых диэлектриков и обратного у жидкостей при некоторых экспозициях напряжения, например, в области крутизны 10 – 10^2 кВ/мкс для большинства горных пород и жидких углеводородов.

В практике электровзрыва имеются случаи, когда из технологических соображений достаточно жестко ограничиваются

некоторые условия инициирования разряда: тип окружающей среды, длина межэлектродного промежутка и другие. Например, при бурении скважины диаметром 100 мм / не может быть более 50 мм, а практически еще меньше. Часто из всего многообразия возможных типов окружающих сред технологична лишь техническая вода. В этих случаях возможности для инициирования ограничены весьма строгим сочетанием параметров импульса, конфигурации электродов.

Инициирование разряда в твердых диэлектриках при небольших расстояниях между электродами ($\sim 0,5\text{--}5$ см), а также при использовании в качестве окружающей среды жидкостей с высокой электропроводностью (например, воды) эффективно, а зачастую единственно возможно при использовании импульсов с весьма малой экспозицией напряжения ($\sim 10^{-7}\text{--}10^{-6}$ с).

Установлено, что электрическая прочность жидких диэлектриков с уменьшением экспозиции возрастает круче, чем у твердых диэлектриков, и в области указанных экспозиций превосходит прочность твердых диэлектриков. Отвлекаясь от конкретных материалов, обобщенные вольт-временные характеристики для межэлектродных промежутков с одинаковой геометрией электродной системы подобны показанным на рис. 2.4. Для промежутков сантиметрового диапазона точка пересечения кривых находится в области $10^{-7}\text{--}10^{-6}$ с, при этом чем выше диэлектрические свойства у жидкости и чем ниже у твердого диэлектрика, тем при большей экспозиции наблюдается пересечение.

При воздействии на систему, приведенную на рис. 2.4, ко-соульного импульса с фронтом ОВ при размещении $t_{\text{ж}}$ в течение времени будет пробит жесткий диэлектрик и после снятия среза напряжения твердый диэлектрик остается электрически ненарушенным. При воздействии импульса с крутизной ОА, наоборот, подвергается пробой твердый диэлектрик при экспозиции $t_{\text{т}}$. Для импульса ОК пробой жидкого и твердого диэлектриков равновероятен. Поскольку ионизационные явления

у острия возникают первоначально в жидкости, феномен пересечения вольт-временных характеристик следует связать с разной эффективной скоростью прорастания канала сквозной проводимости в диэлектриках с различным фазовым состоянием.

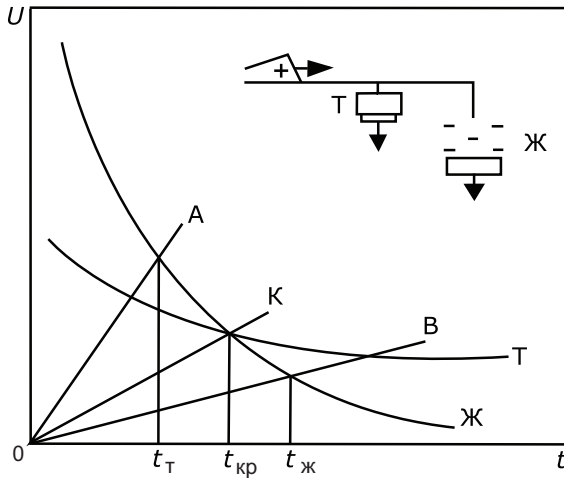


Рис. 2.4. Обобщенные вольт-временные характеристики для межэлектродных промежутков с одинаковой геометрией

Пробивное напряжение любого промежутка — величина статистическая, поэтому вольт-секундные характеристики могут быть представлены полосами разброса (см. рис. 2.5). Пренебрегая хвостами распределения и полагая, что полосы разброса охватывают все значения пробивных напряжений, можно выделить три сектора: α (между осью ординат и прямой ОА) — область пробоя твердого диэлектрика с вероятностью 100 %, γ (между осью абсцисс и прямой ОВ) — область пробоя жидкого диэлектрика с вероятностью 100 %, β (между прямыми ОА и ОВ) — область пробоя твердого диэлектрика с вероятностью ψ' и жидкого диэлектрика с вероятностью ψ'' ; причем $0 < \psi' < 100$, $0 < \psi'' < 100$, $\psi' + \psi'' = 100$. Таким образом в об-

ластях крутизны импульса, соответствующих углу φ , возможен пробой твердого диэлектрика при его параллельном включении с промежутком в жидком диэлектрике, как показано на рис. 2.4.

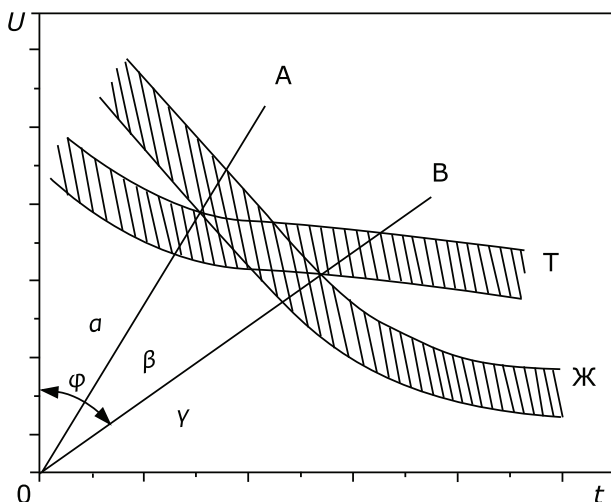


Рис. 2.5. Представление вольт-секундных характеристик полосами разброса

Условия пробоя твердого диэлектрика в электродных системах, подобных изображенным на рис. 2.3, менее благоприятны, так как здесь в параллельном комплексе с твердым телом находится также граница его раздела с окружающей средой. Наиболее сложным для инициирования представляется вариант на рис. 2.3, *в*, так как кратчайшим расстоянием между электродами является путь перекрытия промежутка по границе раздела фаз.

Вследствие адсорбирования примесей и интенсификации емкостных токов вольт-временная характеристика перекрытия (при равных межэлектродных расстояниях) лежит ниже, чем кривая пробоя жидкости (см. рис. 2.6).

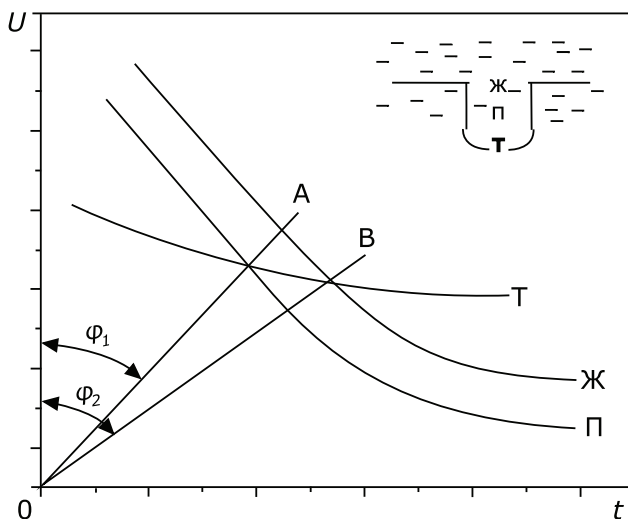


Рис. 2.6. Вольт-временная характеристика, показывающая положение кривой перекрытия и кривой пробоя жидкости при равных межэлектродных расстояниях

Однако, практически, для любой пары диэлектриков (в том числе и для случая, когда в качестве жидкости используется техническая вода) в некоторой области экспозиции (для $\text{H}_2\text{O} \sim 10^{-7}$ с, для жидкостей на нефтяной основе $\sim 10^{-6}$ с) имеется определенная вероятность $\psi' > 0$ пробоя твердой компоненты, достаточная для ее практического использования.

Вольт-секундные характеристики пробоя твердых и жидких диэлектриков в первом приближении могут быть аппроксимированы зависимостью вида

$$U = U_1 \cdot \sqrt{1 + \frac{\tau}{t}}, \quad (2.5)$$

где U_1 , [кВ] и τ [с] — постоянные коэффициенты.

От точки пересечения двух монотонных зависимостей вида (2.5) разница в значениях функции U с изменением аргу-

мента t должна нарастать, т. е. следует ожидать увеличения ψ' при снижении экспозиции до 10^{-7} – 10^{-8} с и далее. Однако, наличие границы раздела диэлектриков меняет ситуацию. Имеются отдельные данные о существовании оптимума в кривых $\psi'(t)$, связанного, как полагают, с интенсификацией емкостных токов по поверхности твердого диэлектрика при высоких значениях dU/dt .

К сожалению, систематических данных по этому вопросу нет и не представляется возможным раскрыть природу оптимальной экспозиции.

Негативное влияние скользящих разделов при инициировании канала пробоя в твердых диэлектриках проявляется также через динамику искажения электрического поля в промежутке в процессе развития актов ионизации на поверхности раздела фаз. Например, в системе электродов на рис. 2.3, в с ростом напряжения от одного из электродов по поверхности развиваются каналы неполного пробоя, потенциал электрода выносятся на их головки, в окрестностях которых уже появляются акты ионизации в толще твердого диэлектрика. На рис. 2.7 приведена стилизованная картина следования отдельных этапов, отражающая этот факт.

При малых межэлектродных промежутках ($l < 2$ см) конфигурация поля, определяемая геометрией электродов и их расположением относительно поверхности твердого тела, в существенной степени определяет вероятность ψ' . Так, при наличии одной свободной поверхности у твердого тела наилучшие результаты достигаются при положительном импульсе, посылаемом на электрод, поднятый над поверхностью образца на высоту $\sim 0,25 \cdot l$, в то время как заземленный электрод прижат к поверхности. В этом случае к моменту прорастания лидера до границы раздела диэлектриков на его головке создается напряженность, достаточная для ионизации твердого диэлектрика в точке касания лидеров поверхности.

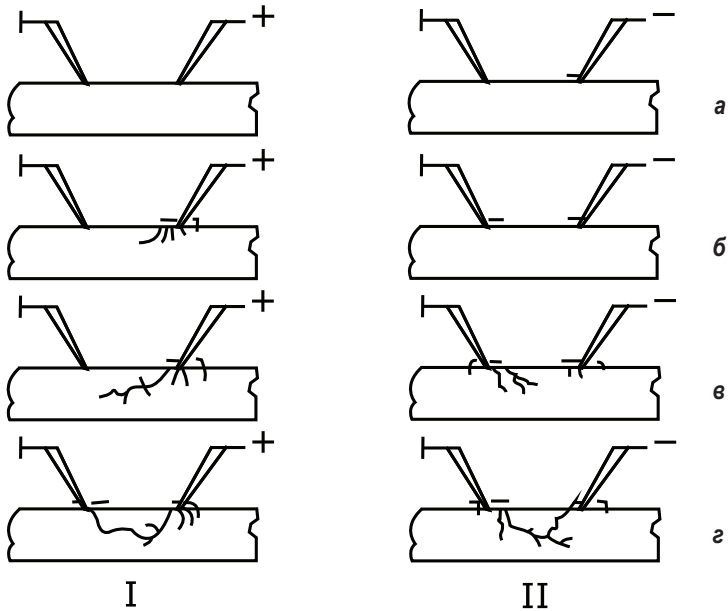


Рис. 2.7. Стилизованная картина следования отдельных этапов развития каналов неполного пробоя по поверхности с актами ионизации в толще твердого диэлектрика.

Последовательность по вертикали (сверху вниз) соответствует развитию процесса во времени:

I — при положительной полярности импульса, II — при отрицательной

На рис. 2.8 приведены стилизованные схемы динамики роста канала пробоя для некоторых сочетаний расположения электродов и полярности импульса; следует отметить, что, несмотря на симметричное расположение электродов, за счет экранирующего действия земли максимальная неоднородность поля наблюдается у потенциального электрода. Это, а также эффект полярности, позволяет интерпретировать схемы процесса, проиллюстрированного на рис. 2.8.

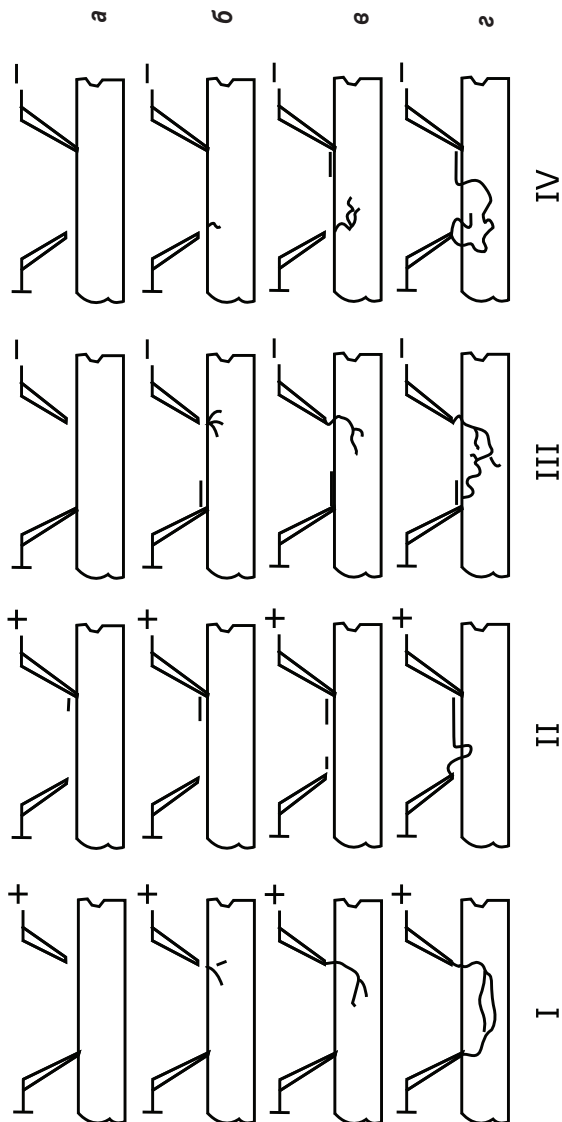


Рис. 2.8. Стилизованные схемы динамики прорастания канала пробоя для некоторых сочетаний расположения электродов и полярности импульса

Эти схемы получены в результате обобщения экспериментальных исследований по пробой образцов органического стекла в трансформаторном масле при межэлектродном промежутке 10–40 мм. Они хорошо иллюстрируют влияние на процесс инициирования конфигурации поля в промежутке. Однако на все возможные сочетания условий их распространять нельзя.

С ростом длины промежутка пробивное напряжение диэлектриков в неоднородном поле возрастает, как известно, не линейно. Это в полной мере относится к горным породам, рудам и другим объектам электроимпульсной технологии. Более того, макроскопическая неоднородность таких структур, увеличение вероятности существования слабых в электрическом отношении мест создает предпосылки для повышения эффективности и улучшения технологичности приемов инициирования разряда в толще твердых тел с ростом разрядных промежутков.

Действительно, применение жидкостей на нефтяной основе (например, дизельного топлива) позволяет достичь $\Psi' \approx 100\%$ уже при $l \sim 5\text{--}10$ см и $t \sim 10^{-6}$ с для большинства крепких пород, таких как кварциты, роговики, диабазы различных месторождений. Однако, учитывая, что пробивное напряжение при этом

$$U \approx U_1 \ell^n, \quad (2.6)$$

где U_1 , n — постоянные для данного вида породы и крутизны воздействующего импульса, причем $n \sim 0,2\text{--}0,5$, такое инициирование требует достаточно высокой амплитуды импульсов напряжения ($\sim 400\text{--}600$ кВ).

Интересные перспективы при больших межэлектродных промежутках связаны с использованием электрически прочных слабо проводящих жидкостей (некоторых углеводородов, растворов на их основе и др.), проявляющих меньшую степень «разупрочнения» с ростом промежутка.

В этом случае при $l \sim 5\text{--}30$ см и более эффективно использовать для инициирования экспозиции напряжения $10^{-5}\text{--}10^{-3}$ с.

В этой области разрядные градиенты в 2 и более раза ниже, чем при $t \sim 10^{-6}$ с, а для повышения Ψ' практически до 100 % могут быть использованы некоторые закономерности, отмеченные ранее.

Систематические экспериментальные исследования разрядных напряжений на фронте косоугольных импульсов в неоднородном электрическом поле показали, что в области крутизны импульса $\sim 10\text{--}10^2$ кВ/мкс наблюдаются аномальные снижения импульсной электрической прочности, выпадающие из соотношения (2.5), как для газов, так и для конденсированных диэлектриков. Важным с точки зрения инициирования разряда в твердых диэлектриках является несовпадение областей минимальной электрической прочности диэлектриков с различным фазовым состоянием. На рис. 2.9 приведены характерные зависимости разрядного напряжения U от крутизны нарастания косоугольного импульса напряжения α . Такое поведение изоляционных промежутков характерно для неоднородного поля при положительной полярности электрода с большей кривизной поверхности и связано, по мнению ряда исследователей, с усилением поля объемным зарядом, скорость дрейфа которого от острия к плоскости при $\alpha_{\text{кр}}$ совпадает со скоростью распространения зоны ионизации.

Следует отметить, что значения $\alpha_{\text{кр}}$ мало зависят от степени неоднородности поля, длины промежутка, а зависят от фазового состояния диэлектрика. Так, для воздуха $\alpha_{\text{кр}} \sim 7$ кВ/мкс, для твердых диэлектриков (битум, парафин, лед, щелочно-галоидные кристаллы и др.) $\alpha_{\text{кр}} \sim 30$ кВ/мкс, для трансформаторного масла $\alpha_{\text{кр}} \sim 150$ кВ/мкс.

Эффекты аномального снижения электрической импульсной прочности, конечно, должны проявляться на импульсах равной формы (в том числе и квазипрямоугольной). Однако, систематические данные в этом направлении отсутствуют.

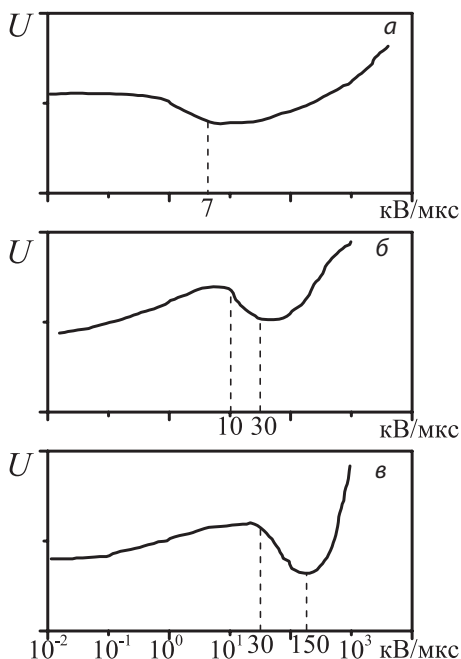


Рис. 2.9. Характерные зависимости разрядного напряжения U от крутизны нарастания косоугольного импульса напряжения для: воздушной изоляции — *a*, твердых диэлектриков — *б* и трансформаторного масла — *в*

Интересно, что в той же области экспозиций, где наблюдается минимум прочности для твердых диэлектриков, имеет место обратный эффект полярности у жидких углеводородов, например, у трансформаторного масла. Поэтому применение импульсов положительной полярности оправдано и здесь.

Инициирование разряда в твердых диэлектриках при электрической форме пробоя с использованием «длинных» импульсов предъявляет более жесткие требования к характеристикам окружающей среды. Так, применение жидкостей на водной основе, характеризующихся повышенной электропроводностью

и низкими разрядными градиентами при больших экспозициях, практически невозможно.

Характеризуя в целом инициирование разряда в толще твердых диэлектриков при электрической форме пробоя, следует отметить, что этот способ сопряжен с применением сложной высоковольтной техники, требует весьма нетривиальных решений по генерированию и канализации импульсов с амплитудой 200–500 кВ и более. С другой стороны, такой способ характеризуется весьма малыми затратами энергии на формирование токопроводящего канала, а во многих случаях представляется единственно возможным для технологического использования электровзрыва в толще диэлектрических твердых тел.

К настоящему времени еще не достигнуто детальное понимание основных закономерностей проникновения канала в толщу твердого диэлектрика при его параллельной комбинации с жидкостью и газом, в том числе по такой важной для инициирования характеристике, как глубина проникновения в системе электродов, расположенных на одной поверхности.

2.3. Инициирование разряда электротепловым пробоем жидких и твердых диэлектриков

Электротепловой пробой как форма инициирования разряда по сравнению с электрическим пробоем характеризуется повышенными энергозатратами, большими возмущениями среды в предпробойной стадии. Однако, электротепловой пробой (и для практики это важно) может быть осуществлен при существенно меньших напряжениях на электродах, чем электрический.

В жидкости электротепловой пробой обусловлен развитием ионизации в газовой фазе, предварительно образовавшейся вследствие вскипания или электролиза. Экспозиции напряжения, при которых реализуется электротепловой механизм, будут выше значений, приведенных в табл. 2.1.

При напряженности поля $10^{-1}–100$ кВ/см за счет испарения жидкости между электродами образуется газовый мостик и пробой происходит по газовой фазе. Образование газового мостика — энергоемкий процесс, протекающий в течение сотен тысяч микросекунд, что значительно превышает время лидерного пробоя.

На рис. 2.10 показаны последовательность явлений в промежутке, осциллограммы тока и напряжения при таком способе инициирования.

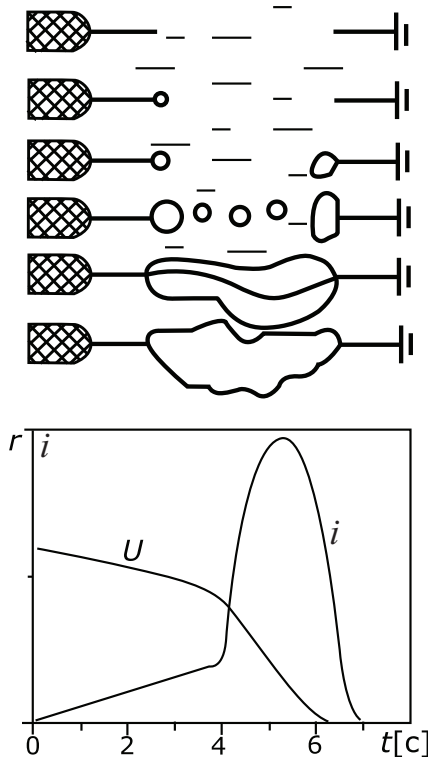


Рис. 2.10. Последовательность явлений в промежутке, осциллограммы тока и напряжения при образовании газового мостика

Для снижения потерь на фазовые превращения применяют небольшие межэлектродные промежутки. Например, при $C = 320$ мкФ, $U = 1,6$ кВ, индуктивности разрядной цепи $L = 0$, 1 мкГн в водном растворе NaCl (1,5 %) инициирование с потерями $\sim 15\%$ может быть достигнуто при $l \approx 0,1$ см, при этом задержка пробоя $t = 30$ мкс. По мере протекания разрядного тока за счет собственного магнитного поля искровой канал может быть удлинен при использовании специальной электродной системы (см. например, рис. 2.11). Удельное энергосодержание продуктов искрового канала при инициировании электротепловым способом за счет вовлечения в канал газовой фазы, предварительно сформированной в промежутке, невелико, особенно на первых порах расширения канала. Это снижает пиковое давление в канале и иногда является причиной отказа от такого способа инициирования.

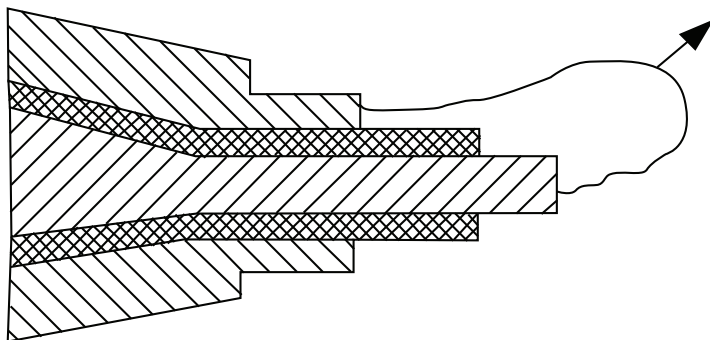


Рис. 2.11. Пример специальной электродной системы, используемой для удлинения искрового канала за счет собственного магнитного поля

При напряженностях поля выше 10 кВ/см весьма вероятно, что ионизационные процессы в газовой фазе и рост газовой фазы взаимообусловлены. Вопрос о том, что первично: образование газа или акты ионизации, носит научный характер. Практически же важно, что с ростом напряженности поля за-

траты энергии на инициирование снижаются, объем газовой фазы в промежутке уменьшается.

Несмотря на недостатки, инициирование разряда при средних напряженностях $\sim 10\text{--}20$ кВ/см нашло широкое применение в электрогидравлической технологии.

Инициирование электровзрыва электротепловым пробоем в твердых диэлектриках встречается реже и реализуется обычно в схемах параллельного включения источника переменного тока и генератора импульсов. Источник переменного тока служит при этом для формирования канала повышенной проводимости, т. е. для теплового пробоя, осуществляемого при весьма низких градиентах $10^{-1}\text{--}10$ кВ/см с экспозицией $10^{-1}\text{--}10^2$ с.

Интересно отметить, что при таких экспозициях определенное влияние на динамику пробоя могут оказать поляризационные заряды, накапливаемые на границе раздела твердого диэлектрика и окружающей среды. Так, в системе электродов, расположенных на одной свободной поверхности (см. рис. 2.3, в), при $l > l_{\text{кр}}$ и $\epsilon_{\text{т}}/\epsilon_0 \geq 1,4$ область максимальных напряженностей электрического поля перемещается с поверхности в толщу твердого диэлектрика (здесь $l_{\text{кр}} \approx 10$ см; $\epsilon_{\text{т}}$, ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость твердого диэлектрика и окружающей среды обычно $\epsilon_{\text{т}} > 2$, $\epsilon_0 \approx 1$).

Сфера возможного применения теплового пробоя достаточно узка. С применением промышленной частоты обычно осуществляют пробой в полупроводящих породах, содержащих магнетит, сульфиты и другие материалы с малым начальным удельным сопротивлением ($\sim 10^3$ Ом·см). Некоторое расширение класса объектов такого инициирования достигается применением напряжения высокой частоты, разрешенного для промышленности диапазона 170—749 кГц.

В качестве окружающей среды при инициировании обычно используется естественная атмосфера, и это является одним из важных преимуществ метода. Однако, это же ограничивает предельные градиенты напряжения, а следовательно, и типы разрушаемых материалов.

2.4. Инициирование разрядов введением инородностей

Здесь мы рассмотрим группу приемов инициирования разряда в жидкости, связанных с введением диэлектрических, металлических либо комбинированных инородностей в межэлектродный промежуток и направленных на снижение пробивных градиентов, локализацию разряда по определенной траектории, защиту изоляции электродов.

Введение диэлектрических неоднородностей

Преследуется цель ослабления электрической прочности промежутка за счет искажения электрического поля и применения инородностей с низкой электрической прочностью. Используются струи газовых пузырей, вязкой жидкости, суспензий, растворов, порошков. Материал инородностей подбирают так, чтобы его диэлектрические характеристики (проницаемость $\epsilon_{\text{и}}$ и электропроводность $\sigma_{\text{и}}$) существенно отличались от характеристик жидкости ($\epsilon_{\text{ж}}$, $\sigma_{\text{ж}}$), в которой осуществляется инициирование. При этом для слабопроводящих жидкостей ($\sigma_{\text{ж}} \leq 0,02 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$) и малых экспозиций напряжения ($t \leq 10^{-5} \text{ с}$) определяющее значение играет диэлектрическая проницаемость, для сильнопроводящих жидкостей и больших времен до пробоя — электропроводность. Стремление к резкому усилению поля в толще и на границе инородности приводит к соотношению $\epsilon_{\text{и}} \ll \epsilon_{\text{ж}}$, $\sigma_{\text{и}} \gg \sigma_{\text{ж}}$. Наиболее распространенным техническим приемом введения диэлектрических инородностей является их ввод через один из рабочих электродов синхронно с подачей импульса напряжения. В этом случае инородность попадает непосредственно в область максимальных градиентов напряжения.

Проиллюстрируем возможности такого инициирования на примере весьма перспективного инициирования струей вязкой жидкости. На рис. 2.12 изображена электродная система, разрядный промежуток которой иницируется струей жидкости.

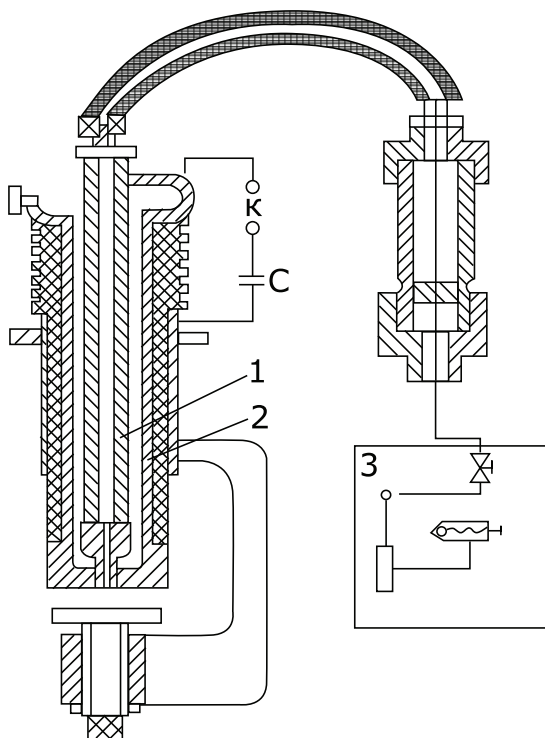


Рис. 2.12. Электродная система, разрядный промежуток которой иницируется струей жидкости на основе веретенного 70 % масла с наполнителем (Al порошок — 20 %, мел — 10 %):

1 — полый стержень, 2 — цилиндрический токовод,
3 — гидравлическое устройство

Полый стержень 1 расположен в цилиндрическом токовом 2 таким образом, что образует с ним радиально-щелевой канал, переходящий в сопло. По этому каналу из технологической разрядной камеры прокачивается рабочая жидкость, а через центральное сопло в необходимый момент с помощью гидравлического устройства 3 впрыскивается струя вязкой жидкости, иницирующей разряд. Радиально-щелевая

струи, охватывающая струю инициатора, выполняет охранное действие, увеличивая в 2–4 раза длину его устойчивого пути. Сравнительные эксперименты (рабочая жидкость — вода с $\sigma = 0,256 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, $C = 6 \text{ мкФ}$, $U = 47 \text{ кВ}$) показали, что применение такого инициирования позволяет увеличить длину межэлектродного промежутка, подверженного стабильному пробое с 4,5 до 9 см, при этом относительное давление в волне, излучаемой каналом пробоя, возросло примерно в 5 раз по сравнению с самопробоем.

Близким по цели методом инициирования является применение скользящего разряда, что можно рассматривать как введение в промежуток твердого диэлектрика. Вследствие адсорбирования примесей, интенсификации емкостных токов, искажения поля градиенты напряжения перекрытия ниже, чем при пробое в толще жидкости. Для повышения стойкости твердого диэлектрика под действием волн давления, а также продуктов искрового канала применяют межэлектродные промежутки специальной геометрии. Для примера на рис. 2.13 приведена электродная система коаксиальной геометрии.

Перекрытие осуществляется между электродами 1 и 3 по поверхности изолирующего вкладыша 2, который находится в напряженном (обжатом) состоянии, что позволяет воспринимать ему без разрушения в 4–5 раз большие ударные нагрузки. В такой системе искровой канал, возникнув на поверхности изолятора, по мере нарастания тока «выжимается» на ось системы, что снижает разрушительное действие продуктов канала на поверхность твердого диэлектрика.

Применение диэлектрических неоднородностей особенно эффективно в том случае, если это стимулирует электрическую форму пробоя, снижает предпробивные потери энергии в жидкости. Следует, тем не менее, отметить, что такому способу инициирования присущи определенные недостатки: загрязнение жидкости и объектов технологии, снижение стойкости электродной системы, усложнение технологического узла и др.

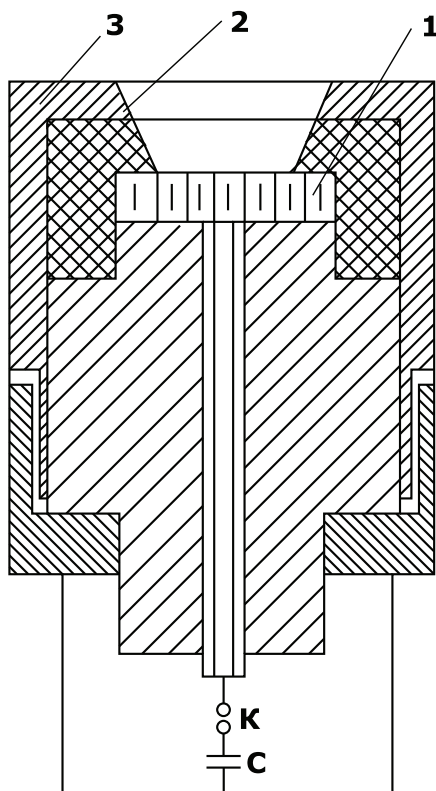


Рис 2.13. Электродная система коаксиальной геометрии:

1, 3 — электроды, 2 — изолирующий вкладыш

Инициирование разряда металлическими вставками и проводящими примесями

Введение в разрядный промежуток металлических вставок, взвешенных металлических частиц, порошков и т. д. позволяет существенно снизить рабочие градиенты, локализовать место пробоя вплоть до обеспечения в ряде случаев заданной геометрии разрядного канала и несколько снизить предпробивные потери в сильнопроводящих жидкостях.

При инициировании с помощью металлической вставки в промежутке перед подачей на него импульса напряжения устанавливается проводник: проволока, фольга. В процессе протекания разрядного тока материал проводника претерпевает явление электрического взрыва (ЯЭВП), природа и закономерности которого будут рассмотрены далее. Здесь лишь отметим, что при инициировании металлической вставкой проводник до взрыва поглощает лишь малую долю энергии, запасенную в накопителях, а ее основная часть выделяется в искровом канале, сформированном по газообразным продуктам распада взорвавшегося проводника. При этом использование слишком тонкого проводника не дает заметного снижения пробивных градиентов, так как не вносит существенных возмущений в жидкость; напротив, применение «толстых» проводников приводит к тому, что ЯЭВП даст основные гидродинамические возмущения в окружающей среде, а роль искрового канала будет второстепенна, либо повторного пробоя промежутка после взрыва проводника вообще не будет. Этот последний случай представляет самостоятельный интерес.

При инициировании искрового канала в воде с помощью цилиндрической проволоки с диаметром d и длиной l оптимальные условия для инициирования возникают при

$$d \approx 2 \cdot \left[\frac{W}{z \cdot \rho \cdot \sigma \cdot (\lambda + \lambda_1)} \right]^{\frac{1}{4}}; \quad (2.7)$$

$$l \approx 2 \cdot 10^3 \cdot U \cdot \sqrt[4]{L \cdot C}, \quad (2.8)$$

где $W = \frac{C \cdot U^2}{2}$, $z = \sqrt{\frac{L}{C}}$, U — напряжение на емкостном нако-

пителе перед коммутацией; C — емкость накопителя, L — индуктивность разрядной цепи; ρ , σ , λ и λ_1 — плотность, удельная электропроводность, удельные теплоты плавления и парообразования материала проводника, соответственно.

Определенные трудности инициирования взрывающимся проводником связаны с необходимостью автоматизации подачи проводника в промежуток. К настоящему времени имеется несколько предложений для осуществления этой операции. Вследствие явлений надреза и приварки проводников в местах контакта с тоководами надежность большинства предложений не может быть признана удовлетворительной, особенно при высокой частоте следования импульсов. На рис. 2.14 приведен пример устройства автоматической подачи цилиндрической инициирующей вставки. При вращении диска 1 с укрепленными на нем зажимами 2 с барабана 3 поступает инициирующая проволока 4. В положении, приведенном на рис. 2.14, срабатывает управляемый коммутатор К и конденсатор С подключается к электродам 5. После пробоя весьма малых зазоров между электродами и проволокой ее участок «а-б» подвергается электрическому взрыву. Следующее срабатывание коммутатора синхронизируется с моментом, когда диск повернется в направлении, указанном стрелкой, на $1/6$ оборота. Нож 7 служит для очистки зажимов от отходов проводника, остающихся в зажимах после взрыва. С целью исключения приварки проволоки к зажимам электроды расположены так, что разрядный ток минует зажимы. Через отверстие 6 твердофазные отходы инициирующей проволоки выводятся из камеры.

Кроме общих преимуществ способов инициирования, связанных с введением в разрядный промежуток инородностей, способ инициирования с помощью металлической вращающейся вставки позволяет провести инициирование в жидкостях с весьма высокой электропроводностью (до $1 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ и более), при этом смачиваемая поверхность электродов может быть существенно увеличена по сравнению с другими способами инициирования. Это позволяет повысить долговечность изоляции электрода и уменьшить его относительный эрозионный износ.

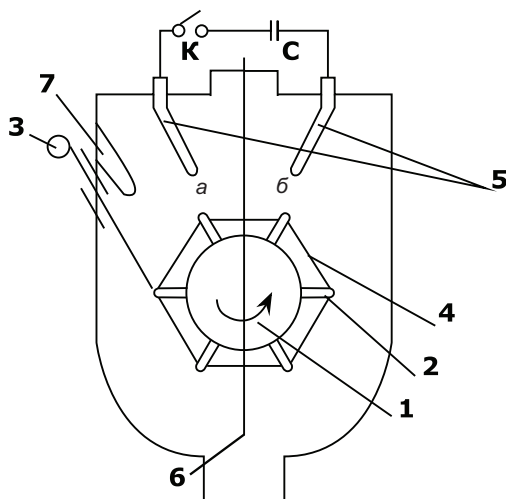


Рис. 2.14. Устройство автоматической подачи цилиндрической иницирующей вставки:

1 — диск с укрепленными на нем зажимами (2); 3 — барабан, 4 — иницирующая проволока; 5 — электроды; 6 — отверстие вывода отходов из камеры; 7 — нож; К — управляемый коммутатор; С — конденсатор

Вместе с отмеченными преимуществами данный способ иницирования имеет существенные недостатки: затраты энергии на стадии нагрева, плавления и испарения проводника достаточно велики (100–300 Дж на 1 см проводника); устройства механизированного ввода проводников сложны и недостаточно надежны; происходит загрязнение рабочей жидкости продуктами разложения проводника, а также весьма существенный расход металла.

С учетом отмеченного способ обычно реализуется для высокоэнергетических установок (десятки-сотни кДж) с частотой следования импульсов не более 0,5–1 Гц при необходимости иницирования в сильнопроводящих жидкостях. Имеется ряд предложений по иницированию искрового канала путем подачи в промежутки струи высокоплотной пульпы — по-

рошка ферросилиция в воде, струй из раствора лития в жидком аммиаке, взрыву струи лития, извлекаемого в разрядный промежуток непосредственно из оконечности токопровода электродной системы. Поясним особенности такого инициирования на примере применения струи пульпы из порошка силиция в воде. Частицы металла 0,5–1,5 мм, плотность пульпы такова, что суммарный жидкостный промежуток отвечает условиям пробоя.

После пробоя часть частиц силиция измельчается, но тем не менее вся масса их может многократно использоваться, для чего предусматривается система регенерации. Система инициирования состоит из насоса, трубопровода и узла ввода частиц в поток. В качестве твердой составляющей пульпы можно использовать также измельченную стружку черных и цветных металлов, отходы огневой зачистки металла и т. д.

Инициирование искрового канала введением комбинированных примесей

Для упрощения и удешевления инициирования разряда методом взрыва проводников-проволочек предложены различные модификации. К ним можно отнести устройства с протяжкой через межэлектродный промежуток металлизированной диэлектрической нити. Такое устройство снабжается системой для нанесения металлического покрытия на нить или металлизированной пасты на клеевой основе. В процессе разряда испаряется только металлическое покрытие, а диэлектрическая нить (например, капроновая леска) не разрушается, и лишь после многократного воздействия возмущений, генерируемых при разрядах, в толще диэлектрической нити появляются газовые включения и продукты коксования. Имеются также предложения по использованию для инициирования электрического взрыва бумажных лент, пропитанных электролитом. Такой метод рекомендуется для инициирования в неводных жидкостях.

2.5. Использование вспомогательных источников электрических сигналов для инициирования разрядов

Этот способ инициирования основан на использовании дополнительного источника электрической энергии, предназначенного для формирования канала сквозной проводимости или подготовки условий для его создания. Технические приемы, используемые при этом, исключительно многообразны и зависят от условий в межэлектродном промежутке (характеристик среды, длины промежутка и т. д.), а также добавочных целей, которые ставятся при таком способе инициирования.

Вспомогательный источник может генерировать сигналы промышленной частоты, высокой частоты, импульсы, которые воздействуют либо на основной межэлектродный промежуток, либо на вспомогательный (поджигающий).

Основное достоинство, которым обладает способ инициирования от вспомогательного источника электрических сигналов, заключается в снижении габаритов, веса и стоимости высоковольтного оборудования, обеспечивающего технологический цикл, ибо основной накопитель электрической энергии выполняется на сравнительно низкий класс напряжения (для электроимпульсной технологии ~ 50–100 кВ). Кроме того, комбинирование схемы 2 источников, работающих параллельно на одну нагрузку, позволяют независимо регулировать параметры электрического сигнала в предпробивной и завершающей стадии электрического пробоя при изменении характера нагрузки. Например, для электроимпульсного бурового станка амплитудно-временные характеристики импульса напряжения должны быть скоординированы с вольт-секундной характеристикой межэлектродного промежутка. Использование вспомогательного источника импульсов позволяет добиваться такой координации без изменения параметров энергетического пакета, поступающего в канал пробоя от основного накопителя энергии.

Проанализируем основные принципы построения электрических схем при инициировании разряда от вспомогательных источников электрических сигналов.

Параллельная работа ГИН и ГИТ

Наиболее часто используют в качестве вспомогательного источника генератор импульсов напряжения (ГИН), работающий параллельно с основным источником — генератором импульсных токов (ГИТ) на один межэлектродный промежуток. При этом уровень напряжения U_1 ГИН по сравнению с уровнем U_2 ГИТ находится в соотношении $U_1 > U_2$ или $U_1 \gg U_2$, а энергия W_1 , запасенная в накопителях ГИН, и энергия W_2 ГИТ — в соотношении $W_1 \ll W_2$.

ГИТ — источник с малым внутренним сопротивлением z_2 , будучи подключен параллельно к рабочему межэлектродному промежутку, не позволяет развить на нем импульсы напряжения от ГИН — источника с большим внутренним сопротивлением z_1 . Для решения этой проблемы в цепь разряда ГИТ необходимо установить токоограничивающий элемент z_3 так, что $z_3 \geq z_1$. После пробоя рабочего промежутка ограничитель тока в цепи ГИТ в большинстве случаев — элемент нецелесообразный, так как препятствует быстрому выделению энергии в нагрузку. Конкретные варианты схем предусматривают различные приемы по снижению (иногда значительному) величины z_3 после пробоя рабочего промежутка.

На рис. 2.15–2.16 приведен ряд примеров параллельного включения генератора напряжений C_1 и генератора тока C_2 . Цепи зарядки генераторов упрощены и представлены в виде источников постоянного напряжения и защитных резисторов R_1 и R_2 . Рабочий промежуток (нагрузка) изображен в виде элементов РП. Рассмотрим работу приведенных схем.

В схеме (см. рис. 2.15, а) используется управляемый разрядник P_2 с широкой областью неперестройки. При пробое P_1 импульс ГИН воздействует на объект и на разрядник P_2 , послед-

ний, однако, отстроен так, что не срабатывает под действием импульса ГИН. После пробоя рабочего промежутка разрядник P_2 находится под разностью потенциалов U_2 и после его поджига C_2 разряжается на рабочий промежуток. Известны многозазорные газовые разрядники с коэффициентом неперестройки $K \approx 10$.

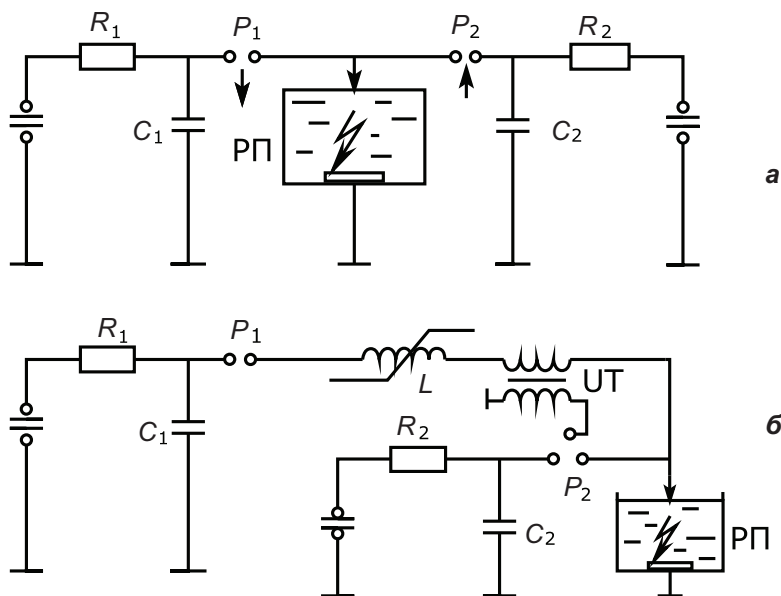


Рис. 2.15. Примеры параллельного включения генератора напряжений C_1 и генератора тока C_2 :

а — с использованием управляемого разрядника с широкой областью неперестройки; *б* — с включением в разрядную цепь ГИН импульсного трансформатора

Синхронизация моментов коммутации P_1 , P_2 и пробоя рабочего промежутка не вызывает затруднения. Один из возможных вариантов приведен на рис. 2.15, *б*, где в разрядную цепь

ГИН включен импульсный трансформатор, во вторичной обмотке которого после пробоя РП за счет броска тока в первичной обмотке формируется импульс напряжения с амплитудой, достаточной для пробоя P_2 . Насыщающийся дроссель L служит для ограничения броска тока в разрядной цепи ГИН в предпробивной стадии, связанного с зарядкой паразитных емкостей.

Интересно отметить, что если в схему (см. рис. 2.15, *а*) ввести блок селекции, вырабатывающий запускающий импульс лишь при определенных положительных результатах иницирования, то эффективность использования энергии накопителей ГИТ может существенно возрасти. Такие возможности желательно реализовать, например, при иницировании канала пробоя в толще твердых диэлектриков, когда, как показано, вероятность проникновения канала пробоя в толщу диэлектрика $\psi_1 < 1$.

Устройства на рис. 2.15, *а*, *б* и подобные им работоспособны при $kU_2 > U_1$. Этим условием, а также большими потерями энергии в коммутаторе P_2 , его сложностью и ограниченной надежностью определяются их возможности. Большие потери в разряднике P_2 связаны с необходимостью выбора зазора на уровень $U > U_1$.

При включении в разрядную цепь ГИТ токоограничивающего дросселя и импедансом, достаточным для формирования импульса от ГИН на РП, разрядник P_2 выполняется неуправляемым с зазором на класс U_2 . Если же объектом является промежуток с высокими диэлектрическими свойствами, то P_2 может отсутствовать.

На рис. 2.16 приведен пример выполнения схемы с разделительным насыщающимся дросселем. Его параметры выбираются так, чтобы режим насыщения наступал после пробоя РП. Недостатком схемы, вытекающим в связи с введением дросселя в цепь ГИТ, является уменьшение амплитуды тока ГИТ и увеличение длительности выделения энергии в РП.

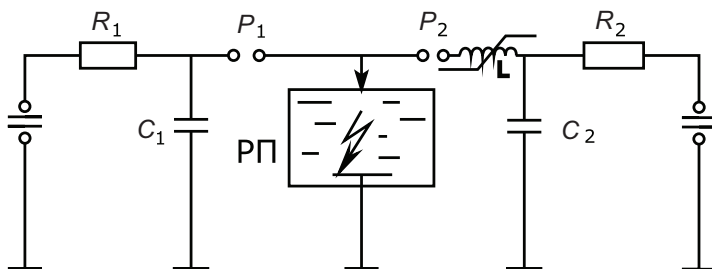


Рис. 2.16. Схема с разделительным насыщающим дросселем

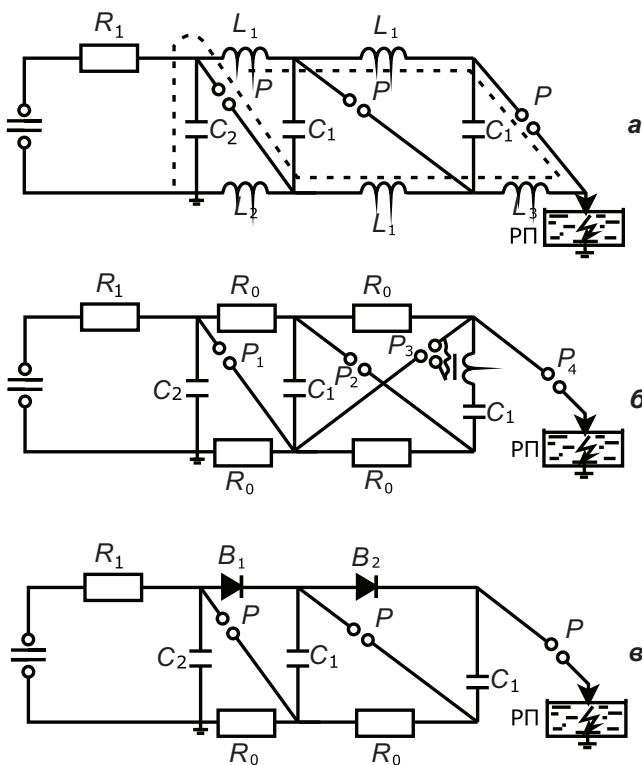


Рис. 2.17. Схемы на базе генератора Маркса

В технике генерирования импульсов высокой амплитуды (сотни кВ и выше) широко используются генераторы по схеме умножения напряжения Маркса, в которых группа конденсаторов заряжается параллельно, а затем переключается на последовательное соединение и подключается к нагрузке. На базе этого устройства имеется несколько схем, близких по принципу к схемам параллельного включения ГИН и ГИТ. На рис. 2.17 приведены примеры.

Схема на рис. 2.17, а — трехступенчатый генератор. Однако, в отличие от обычных условий ($C_2 \approx C_1$, $L_2 = L_1$, L_3 — отсутствует), предполагается, что $C_2 \gg C_1$, $L_2 \gg L_1$, $L_3 = L_1$. Это ведет к некоторым важным особенностям работы схемы. После пробоя первого и последующих разрядных промежутков Р, а затем и РП, через последний протекает разрядный ток ГИН по контуру «земля— C_2 —Р— C_1 —Р— C_1 —Р—РП—земля», а также ток разрядки емкости C_2 (ГИТ) по цепям «земля— C_2 — L_1 — L_1 —Р—РП—земля» и «земля— C_2 —Р— L_1 — L_3 —РП—земля». Таким образом, при определенном подборе параметров такой схемы ее можно рассматривать как схему параллельной работы ГИН и ГИТ, где емкость ГИН — емкость последовательно соединенных накопителей C_2 , C_1 , C_1 , а емкость ГИТ — C_2 . Число ступеней ГИН может быть существенно больше, чем показано на схеме, и это одно из преимуществ схемы, ибо позволяет иметь $U_1 \gg U_2$. С другой стороны, ее недостатком является наличие в разрядной цепи ГИТ токоограничивающих дросселей. Попытки снизить их величину приводят к сокращению длительности импульса напряжения ГИН на нагрузке, вследствие того, что при малых L_1 велика частота колебаний в контурах L_1 — C_1 —Р. Некоторое расширение возможностей схемы связано с применением в качестве элементов L_1 (L_3) — дросселей с насыщающимся сердечником, обеспечивающим снижение индуктивности при протекании тока от ГИТ.

На рис. 2.17, б изображен трехступенчатый генератор, в который введены дополнительные элементы: трехэлектродный управляемый разрядник Р₃ и импульсный трансформатор ИТ

для поджига разрядника. При последовательном пробое искровых промежутков P_1, P_2, P_4 цепь конденсаторов C_2, C_1, C_1 подключается к рабочему промежутку РП. После пробоя РП в цепи «земля—РП— P_4 —первичная обмотка ИТ— C_1 — P_2 — C_1 — P_1 — C_2 —земля» возникает скачок тока, который формирует во вторичной обмотке ИТ поджигающий импульс, срабатывает P_3 и накопитель C_2 подключается к нагрузке по цепи «земля—РП— P_4 — P_3 — P_1 — C_2 —земля». Если учесть емкость C_1 , то эта схема также может рассматриваться как схема параллельной работы ГИН и ГИТ, где емкость ГИТ — C_2 . При увеличении числа ступеней в каждой последующей также устанавливаются элементы P_3 и ИТ. По сравнению с предыдущим примером такое устройство характеризуется меньшей индуктивностью разрядной цепи ГИТ, однако требует применения серии управляемых коммутаторов и элементов их синхронного поджига.

Во всех примерах параллельной работы ГИН и ГИТ, рассмотренных до сих пор, в качестве токоограничивающего (развязывающего) элемента использовались разрядники (коммутаторы), а также индуктивные элементы (линейные и нелинейные дроссели, трансформаторы). Известны случаи использования иных по принципу решений (применение взрывающихся проводников, диодов).

В генераторе импульсов на рис. 2.17, в в качестве разделительных элементов, подключенных к высоковольтному полюсу источника питания, использованы диоды, включенные в направлении протекания токов зарядки накопителей C_1 . После коммутации ГИН и РП емкость C_2 подключается к нагрузке по контуру «земля— C_2 — V_1 — P_1 —РП—земля», при этом $C_2 \gg C_1$. Диоды препятствуют разрядке накопителей C_1 в контурах C_1 — V_1 —Р, а с другой стороны пропускают униполярный импульс тока от ГИТ (C_2). Недостатком схемы является необходимость использования высоковольтных сильноточных выпрямителей, выпускаемых промышленностью на ограниченные параметры и представляющих собой сложные дорогостоящие приборы.

Параллельная работа источников переменного напряжения и ГИТ

Известны случаи использования предварительного пробоя твердых диэлектрических материалов с помощью источника переменного напряжения для создания канала сквозной проводимости с последующим подключением к электродам генератора импульсных токов.

Синхронизация источников может осуществляться переключением с механическим управлением, поскольку ионизованное состояние канала сквозной проводимости, сформированного за счет теплового пробоя, поддерживается достаточно долго.

Рабочее напряжение ГИТ при такой синхронизации обычно не превышает 50–80 кВ. На рис. 2.18 приведена упрощенная схема трансформатора высокого напряжения промышленной частоты и ГИТ. В положении переключателя, изображенном на рисунке, РП подвергается воздействию переменного напряжения. После пробоя РП переключатель переводят в другое положение, замыкается разрядная цепь ГИТ, накопитель которого через элементы B , R был предварительно заряжен. После разряда C на РП схема возвращается в исходное состояние. Операции переключения и замены объекта достаточно легко автоматизировать.

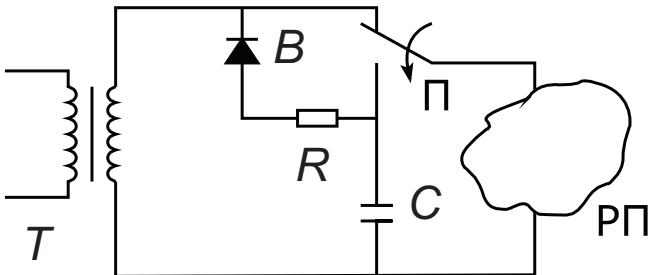


Рис. 2.18. Упрощенная схема трансформатора высокого напряжения промышленной частоты

Для расширения класса диэлектрических материалов, в которых можно осуществить такое инициирование, в качестве источника переменного напряжения иногда используются генераторы высокой частоты (до сотен кГц).

Недостатками схем с параллельной работой источников переменного напряжения и ГИТ являются достаточно большие энергозатраты на пробой РП и большое время до пробоя, однако возможность пробоя и разрушения крупных кусков минерального или искусственного происхождения при ограниченном уровне рабочих напряжений (до 100 кВ) часто искупает этот недостаток.

Использование трехэлектродных рабочих промежутков

Для инициирования разряда в РП от вспомогательного источника напряжения (обычно импульсного) иногда используют трехэлектродные РП, при этом в РП можно выделить основной и вспомогательный зазор; к первому подключается основной генератор импульсов, ко второму — вспомогательный. Использование трехэлектродного РП не требует специальных мер для обеспечения параллельной работы двух генераторов, так как каждый из источников воздействует на свой зазор. Кроме основных целей, преследуемых при инициировании вспомогательными источниками напряжения, использование трехэлектродных РП позволяет добиться некоторых дополнительных преимуществ: локализовать токовый шнур, защитить изоляцию высоковольтного электрода основного промежутка, обеспечить требуемую форму плазменного образования в РП и т.д. Указанное достигается выбором конфигурации трехэлектродного РП, параметрами сигнала, генерируемого вспомогательным источником. Дополнительный (инициирующий) зазор может подвергаться как электрической, так и электротепловой форме пробоя. Иногда дополнительный зазор в комплексе со вспомогательным источником служат для формирования газового пузыря, в процессе расширения перемикающего весь или значи-

тельную часть основного зазора. Образование канала сквозной проводимости в основном промежутке происходит полностью или частично по газовой форме. Стилизованная картина процессов в промежутке для этого случая приведена на рис. 2.19. Расчет энергии вспомогательного источника, необходимой для формирования пузыря с диаметром примерно равным основному зазору, можно провести, используя известные соотношения.

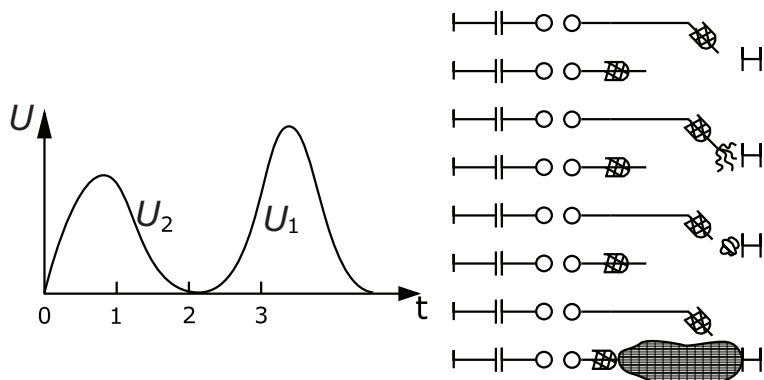


Рис. 2.19. Стилизованная картина процессов в промежутке при формировании газового пузыря

Недостатком способа инициирования с трехэлектродным РП является низкая надежность таких электродных устройств, особенно при больших энергиях основного накопителя, а также появление в основном зазоре до его пробоя фазовых ингредиентов, что не всегда желательно, вследствие их мешающего влияния на развитие гидродинамического процесса при расширении искрового канала.

Глава 3. Электроэрозионный способ обработки материалов

Электрическая сварка, резка и наплавка, электронагрев, термическая обработка с нагревом токами высокой частоты, нагрев в электролитах, электроосаждение металлов (гальванопластика и гальваностегия) и другие технологические применения термического и химического действия электрического тока составляют обширную область современной технологии — электротехнологию.

К электротехнологии относятся и электрические способы обработки металлов, получивших большое развитие за последние десятилетия.

Электрическими способами обработки называются такие виды обработки, при осуществлении которых съем металла или изменение структуры и качества поверхностного слоя детали являются следствием термического, химического или комбинированного действия электрического тока, подводимого непосредственно к детали и инструменту. При этом преобразование электрической энергии в другие виды энергии происходит в зоне обработки, образованной взаимодействующими поверхностями инструмента и обрабатываемой детали.

Электрическая обработка включает в себя электроэрозионные, электрохимические, комбинированные электроэрозионно-химические и электромеханические способы обработки.

При электроэрозионных способах обработки съем металла и изменения свойств поверхности детали являются результатом

термического действия электрического тока. При электромеханических способах введения электрического тока в технологическую цепь, благодаря создаваемому им нагреву, облегчает съем металла резцом.

В свою очередь электроэрозионные способы обработки металлов по назначению различаются на способы, при помощи которых осуществляется:

- а) электроэрозионная размерная обработка металлов (съем металла и придание заготовке заданной формы и размеров);
- б) электроэрозионное упрочение или покрытие (изменение свойств поверхностного слоя).

В настоящее время известны и применяются следующие основные способы электроэрозионной обработки: электроискровой, электроимпульсный и электроконтактный. Практически к этой же группе следует отнести и анодно-механический способ.

В зависимости от того, каким образом производится обработка или упрочнение, можно говорить об электроискровой, электроимпульсной, электроконтактной или анодно-механической размерной обработке или упрочнении.

С появлением электрических способов обработки оказалось в принципе возможным осуществление методами электротехнологии всего комплекса операций, необходимых для превращения заготовки в готовую деталь, включая и ее термическую обработку.

Электроэрозионные способы не исключают механическую обработку, а дополняют ее, занимая свое определенное место, соответствующее их особенностям, а именно: возможности обработки токопроводящих материалов с любыми физико-механическими свойствами и отображения формы инструмента в изделии.

Следовательно, использование электроэрозионных способов обработки будет развиваться и развивается с повышением твердости и вязкости обрабатываемых материалов, усложнением формы детали и обрабатываемых поверхностей (полости слож-

ной конфигурации, отверстия с криволинейной осью, отверстия весьма малого диаметра, тонкие и глубокие щели простой и сложной формы и т. п.), наконец, с улучшением технологических показателей электроэрозионных способов обработки — повышением производительности, чистоты поверхности, точности, стойкости инструмента — и снижением энергоемкости процесса.

Особо перспективным является использование электрических способов для обработки деталей из твердых сплавов, жаропрочных сталей и специальных труднообрабатываемых сплавов, получающих все большее применение в связи с повышением давлений, температур и скоростей в машинах и аппаратах.

Следует также отметить, что развитие современного машиностроения связано со все возрастающим применением взамен обработки резанием, обработки давлением. Последняя же требует изготовления штампов и пресс-форм, обладающих высокой стойкостью.

3.1. Физические условия осуществления размерной электроэрозионной обработки

Для обеспечения качественной размерной обработки металлов за счет использования теплового действия электрического тока необходимо соблюдение следующих трех основных условий:

1. Энергия электрического тока должна подводиться к обрабатываемому участку в виде импульса достаточно малой продолжительности (локализация элементарного съема металла во времени). При непрерывном подводе энергии теряется точность обработки, появляется дефектный оплавленный подслои, ухудшается чистота поверхности и теряется одно из основных технологических качеств электрических способов обработки — свойство отображения (копирования) формы инструмента в детали.

2. Участок детали, к которому подводится импульс энергии, должен быть достаточно мал (локализация съема металла в пространстве). Для того чтобы произвести при подводе импульса энергии к большому участку съема металла, необходимо соответственно увеличить энергию импульса, что приведет к увеличению элементарного съема. Чем больше элементарный съем металла, тем хуже, естественно, чистота поверхности и ниже точность обработки.

Если сохранить при увеличенном элементарном участке импульс энергии неизменным, то съем металла может вообще не произойти, так как подведенной энергии будет недостаточно для расплавления элементарного объема металла.

3. Импульсы энергии должны подводиться к элементарным участкам объема металла, подлежащего удалению, непрерывно и с достаточной частотой (локализация процесса обработки во времени). Это условие обеспечивает непрерывность процесса и получение требуемой производительности.

Указанным трем условиям удовлетворяют в разной степени электрические способы обработки, основанные на тепловом действии электрического тока.

3.2. Способы подвода энергии

Известны три способа подвода энергии электрического тока к обрабатываемой поверхности:

- а) контактный,
- б) через канал разряда,
- в) комбинированный.

Первый и третий способы подвода энергии для размерной обработки либо не используются, либо используются в весьма редких случаях (подготовительные, черновые режимы обработки) и поэтому подробно нами не рассматриваются, а основное внимание уделим способу подвода энергии в зону обработки через канал разряда.

Электрические разряды, вызывающие эрозию металла, различны по своей форме. Характер эрозии зависит от формы электрических разрядов. На практике при электроискровой и электроимпульсной обработке приходится сталкиваться с двумя формами электрических разрядов — искровой и дуговой. Обе формы электрического разряда могут быть получены при помощи электрической схемы, представленной на рис. 3.1.

Источник униполярных импульсов электрического тока периодически возбуждает кратковременные разряды между электродами \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 . Электрод \mathcal{E}_1 образует поверхность инструмента, \mathcal{E}_2 — поверхность обрабатываемого изделия.

Энергия источника тока E через сопротивление R_3 и индуктивность L_3 заряжает конденсатор C до некоторого напряжения, равного пробивному напряжению межэлектродного промежутка.

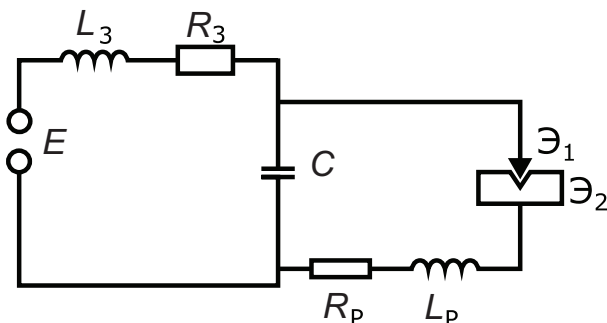


Рис. 3.1. Схема для получения искровой и дуговой форм разрядов

По подготовленному в стадии формирования разряда каналу к месту обработки поступает порция энергии, величина которой определяется продолжительностью и амплитудой импульса и падением напряжения на эрозионном промежутке.

В зависимости от характеристики генератора импульсов может иметь место искровой или дуговой разряд. Для усло-

вий электроэрозионной обработки первый характеризуется большим падением напряжения (50–90 В) и меньшей продолжительностью импульсов (10–500 мкс) при амплитудах тока 1–2000 А. Дуговой разряд обладает меньшим падением напряжения (15–35 В) и большей продолжительностью импульсов (до 10000 мкс).

Величина рабочего напряжения, до которого заряжается накопитель энергии, определяется средой, в которой происходит эрозионная обработка, и расстоянием между электродом-инструментом и обрабатываемой деталью.

Размерная электроэрозионная обработка токопроводящих материалов, как правило, осуществляется в жидкой диэлектрической среде. Наиболее распространенными из них являются керосин и минеральные масла. Установлено, что при электроэрозионной обработке в жидкой среде резко увеличивается количество металла, диспергированного разрядом. Это, естественно, снижает пробивное напряжение промежутка.

На рис. 3.2 приведены графики зависимости величины межэлектродного промежутка от напряжения, приложенного к электродам, в диапазоне напряжений, характерных для электроискровой обработки. Анализ зависимости $U = f(I_n)$ показывает, что в условиях электроэрозионной обработки пробивное напряжение промежутка в сильной степени зависит от вязкости среды. Применение жидкой электрической среды, способной удерживать в межэлектродном промежутке мельчайшие частицы металла, образованные вследствие электрической эрозии, облегчает регулирование величины межэлектродного промежутка.

Энергия, выделившаяся в межэлектродном промежутке, т. е. в объеме, занимаемом взаимодействующими участками электродов и каналов разряда, распределяется между этими участками (анодом и катодом) и внешней средой. Полезную работу производит энергия, поступающая на участок электрода, являющегося деталью; энергия, выделяющаяся на участке электрода-инструмента, приводит к его нежелательному разрушению.

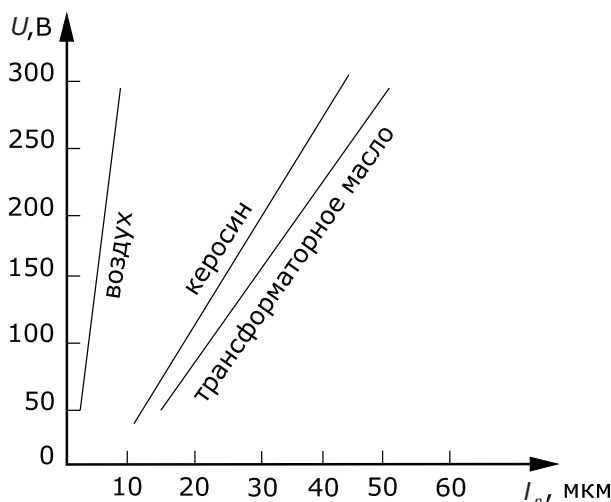


Рис. 3.2. Графики зависимости величины межэлектродного промежутка от напряжения, приложенного к электродам

Электрическая энергия, подводимая к электродам, в основном преобразуется в тепловую, производящую работу по расплавлению и испарению элементарных объемов металла на электродах. Можно представить тепловую энергию, выделяющуюся на электродах, как результат действия двух источников тепла: объемного и поверхностного.

Объемные источники, т. е. источники тепла, выделяющиеся в каждой единице объема электрода, появляются в результате эффекта Джоуля—Ленца, вызванного протеканием тока в объеме электрода. Поскольку величина нагрева в этом случае определяется объемной плотностью тока, а последняя резко уменьшается по мере удаления от поверхности соприкосновения элементарного участка с каналом разряда, наибольшие температуры будут у поверхности участка. Вследствие теплопроводности будет иметь место теплопередача от более нагретых поверхностных слоев в глубь металла.

Поверхностные источники возникают в результате передачи тепла из канала разряда на поверхность соприкосновения канала разряда с электродом. Проникновение тепла с поверхности соприкосновения в глубь элементарного объема происходит вследствие теплопроводности.

При передаче тепла электродам происходит расплавление, испарение и эвакуация частиц металла. То есть под действием электрического тока на электродах образуются ванночки расплавленного металла. Одновременно с этим подготавливаются условия для удаления расплава: возрастает давление газов, окружающих канал разряда. Когда возросшее давление оказывается достаточным для удаления расплава, последний отделяется от ванночки и, попадая в жидкую среду, застывает в виде капелек. На поверхности электрода образуется лунка.

Величина лунки, образующейся в электроде при импульсном разряде, зависит не только от количества энергии, в нем выделенном, но и от того, как и каким образом происходит удаление металла из лунки.

Возможны 5 вариантов выброса металла.

1. Металл выбрасывается в жидком состоянии по мере его плавления, что приводит к наибольшей эффективности процесса и наименьшей ее энергоемкости.

2. В процессе разряда в лунке накапливается жидкий металл, который выбрасывается единовременно только в конце разряда. Этот вариант менее эффективен и более энергоемок, так как накапливаемый металл нагревается до температуры выше температуры плавления.

3. Жидкий металл не выбрасывается, а нагревается до температуры испарения, что приводит к еще меньшей эффективности и наибольшей энергоемкости, так как теплосодержание металла очень велико.

4. Удаление металла происходит испарением; оставшийся в лунке жидкий металл удаляется в конце действия импульса

(этот вариант обладает несколько большей эффективностью, чем предыдущий).

5. Из-за очень быстрого поступления энергии в электрод в нем происходит бурное испарение, носящее взрывной характер (в этом случае эффективность процесса несколько выше, чем вариант 3).

Превалирование того или иного варианта выброса металла зависит от материала электродов и параметров импульса энергии. При очень малой длительности и большой мощности разряда выброс металла имеет пароструйный характер, что приводит к сильному разрушению анода. При малой мощности или малой длительности выброс металла носит в основном паровой характер, анод разрушается в более сильной степени, чем катод, в этом случае производительность обработки невелика. При длительных разрядах или при разрядах большой мощности, но малой длительности, а тем более при большой мощности большой длительности разряд носит дуговой характер. Катод разрушается в более сильной степени по сравнению с анодом; выброс металла носит капельный характер, производительность обработки велика и ограничивается возможностью удаления продуктов эрозии из межэлектродного промежутка.

В механизме эрозии металла существенную роль играют гидродинамические и газодинамические процессы выброса металла.

В настоящее время еще нет общей теории электрической эрозии металлов и явлений, происходящих в межэлектродном промежутке. Еще не установлены все качественные и тем более количественные закономерности. Изучение физической стороны процесса электрической эрозии является предметом дальнейших исследований.

Глава 4. Электроискровая обработка в жидкой диэлектрической среде

Накопленный к настоящему времени теоретический и экспериментальный материал дает возможность сформулировать основные вопросы качественной теории электроискровой обработки металлов в жидкой диэлектрической среде. Очевидно, что, как и при всяком теоретическом рассмотрении реального процесса, эти основные положения будут в той или иной степени приближенными.

Характер допустимых упрощений задачи определяется всей задачей в целом и, как следствие этого, зависит не только от свойств рассматриваемого процесса или явления, но и также от того, на какие именно вопросы желательно получить ответ в теоретическом рассмотрении.

В данном конкретном случае электрической эрозии вопрос о характере упрощений, т. е. о том, какие из свойств реального комплекса процессов, определяющих интересующее нас явление, должны быть учтены в построении его теоретической модели и в каком приближении, играет весьма существенную роль.

Основной задачей качественной теории электроискровой обработки является создание такой физической модели явления электрической эрозии в импульсном разряде, которая позволила бы установить ясный, вытекающий из достаточно общих предпосылок, физический смысл основных черт явления и дать качественное, а в ряде случаев и количественное истолкование связей, наблюдаемых закономерностей и определяющих пара-

метров процесса с процессами на электродах и искровом промежутке. Иными словами, теоретические представления должны дать возможность создать достаточно строгое математическое описание основных характерных сторон явления.

Теоретические построения будут отвечать поставленным задачам, если из всего комплекса процессов, происходящих в ходе эрозии или соответствующих ей, будут рассмотрены основные:

- а) тепловые процессы на поверхности электродов,
- б) энергетические процессы в промежутке и на электродах,
- в) гидродинамические процессы в межэлектродном пространстве.

Очевидно, что названные процессы не охватывают полностью все наблюдающееся. Здесь, например, не рассматриваются термохимические процессы в жидкой среде и на поверхности электродов и некоторые другие.

Рассмотрим подробнее мотивы, руководствуясь которыми намечен названный перечень задач.

Как показано Золотых Б. Н., решение тепловой задачи о процессе распространения тепла от кратковременно действующего источника ограниченных размеров дает возможность получить сведения о ходе явления электрической эрозии, качественно совпадающие достаточно хорошо с опытом.

Вместе с тем, постановка одной только тепловой задачи оставляет открытым весьма существенный вопрос о виде функций теплового источника. Не имея сведений о ее виде, нельзя осуществить сколько-нибудь точные количественные расчеты процесса эрозии. Экспериментальные данные показывают, что вид и характер функции теплового источника определяются временными и энергетическими характеристиками разряда и процессов в искровом промежутке.

Следовательно, чтобы открыть пути к количественным расчетам и оценкам, необходимо решить баланс энергии в искровом промежутке и на электродах, т. е. рассмотреть энергетические процессы.

Однако решение одной только тепловой задачи или задачи о балансе энергии не дает еще возможности достаточно полно описать процессы в искровом промежутке, например, движение жидкости в межэлектродном пространстве и влияние этого фактора на процесс эрозии. Гидродинамические процессы имеют существенное значение при эрозии в жидкой среде. Следовательно, необходимо также рассмотреть вопрос о движении жидкости в межэлектродном пространстве, т. е. решить гидродинамическую задачу. Это позволит получить сведения о природе сил, эвакуирующих металл из лунки, которые до сих пор были не ясны.

Решение этих задач даст желаемый результат только в том случае, если они будут решаться в рациональной взаимосвязи, а не изолированно.

Полученные результаты позволят наметить пути количественного расчета основных технологических характеристик электроискровой обработки и оптимальных режимов.

4.1. Энергетические процессы на электродах и в канале при импульсном пробое в малых промежутках

Распределение энергии между каналом разряда и электродами определяется элементарными процессами в канале разряда и приэлектродных областях. Последние являются весьма тонкими прослойками, расположенными по границе между металлическим проводником и столбом разряда. Столб разряда можно охарактеризовать как газовый проводник, обеспечивающий создание достаточного числа свободных электронов, которые аналогично случаю металлического проводника являются главным носителем тока.

Отрицательный пространственный заряд, создаваемый электронами, компенсируется наличием положительных ионов, которые в силу незначительной по сравнению с электронами

подвижности не играют существенной роли в переносе тока. Можно считать, что практически ток в столбе переносится электронами.

Однако для всего промежутка (включая и приэлектродные области) должны выполняться условия замкнутости (непрерывности) тока, т. е.

$$\begin{cases} \operatorname{div} j_e = 0 \\ \operatorname{div} j_i = 0, \end{cases} \quad (4.1)$$

где j_e — вектор плотности электронного тока, j_i — вектор плотности ионного тока.

Отсюда следует, что в разряде должны образовываться положительные ионы вблизи анода, которые постепенно диффундируют к катоду, аналогично этому в прикатодной области разряда образуются свободные электроны.

Следовательно, на расстоянии порядка длины свободного пробега вблизи анода должна существовать область падения напряжения, обеспечивающая накопление электронами энергии, достаточной для ударной ионизации атомов газа, заполняющего межэлектродное пространство.

В прикатодной части разряда должна существовать область, где бы нейтрализовались ионы и образовались свободные электроны. Поэтому, очевидно, должна существовать область катодного падения, в которой ионы накапливают энергию, и электроны, вышедшие с поверхности катода или образованные каким-либо другим способом, приобретают энергию, достаточную для ионизации в близлежащих к катоду слоях столба разряда. Таким образом, величина прикатодного падения напряжения должна быть близка к потенциалу ионизации газов, составляющих столб разряда.

Эти качественные соображения приводят к выводу, что напряжение на искровом промежутке может быть представлено в виде 3 составных частей:

$$U_n = U_a + U_k + U_c, \quad (4.2)$$

где U_n — полное напряжение на промежутке, U_a — анодное падение напряжения, U_k — катодное падение напряжения, U_c — падение напряжения в столбе разряда.

Величина U_n в случае электроискровой обработки является функцией времени. U_a и U_k определяются природой элементарных процессов в прианодной и прикатодной областях. Вероятно, при установлении равновесной температуры газа они практически не изменяются с изменением тока и остаются постоянными в течение импульса, если его длительность превосходит время выравнивания температуры газа и электронной температуры. Как правило, это время много меньше длительности импульсов, используемых для электроискровой обработки.

Эксперимент подтверждает это предположение (рис. 4.1).

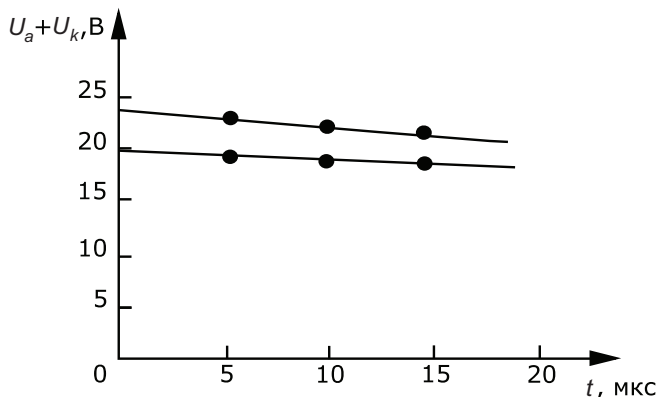


Рис. 4.1. Экспериментальная зависимость падения напряжения от времени в прикатодной и прианодной областях

Другими словами, величина U_c является функцией времени и может быть представлена в виде

$$U_{c|t=\tau_u} = I_{\Pi} E_{\Pi}(t), \quad (4.3)$$

где l_{Π} — величина искрового промежутка, E_{Π} — градиент потенциала в столбе разряда. В табл. 4.1 приведены значения градиента потенциала $E_{\Pi}(t)$ для различных моментов времени.

Таблица 4.1

Градиент потенциала $E_{\Pi}(t)$ для различных моментов времени, кВ/см. Цифры в числителе относятся к амплитудному значению напряжения в импульсе $U_x = 70$ В, $W_u = 0,16$ Дж, в знаменателе для $U_x = 120$, $W_u = 0,4$ Дж. В обоих случаях длина промежутка $l_n = 20$ мкм

Анод	Катод	t , мкс				
		0	5	10	15	19
Cu	W	4,01/4,33	3,06/3,73	2,03/2,8	1,28/1,49	1,9/0,9
Cu	Cu	3,48/4,13	2,68/3,56	2,46/3,00	1,88/2,62	1,31/1,5

4.2. Процессы в столбе разряда

Теоретический расчет параметров и энергетического баланса канала импульсного разряда встречает ряд серьезных трудностей. Ряд величин, входящих в расчет, и связи между ними либо неизвестны, либо при разрядах в промежутках микронной величины пока не поддаются определению.

В принципе задача о развитии канала импульсного разряда, а следовательно, и о параметрах, его определяющих — радиуса, градиента потенциала и температур, должна решаться совместным решением уравнения непрерывности, уравнения движения среды (газа) и уравнением переноса энергии. Общее решение чрезвычайно сложно в силу существенной нелинейности рассматриваемой системы.

При качественной оценке процессов в канале разряда с достаточным приближением можно воспользоваться рядом положений стационарного разряда и некоторыми результатами экспериментов.

Принципиальным, с точки зрения использования положений теории стационарного разряда, является вопрос о том, мо-

жет ли плазма импульсного разряда рассматриваться в определенный момент как изотермическая. В связи с этим рассмотрим вопрос о времени восстановления равновесных температур для некоторых процессов.

Плазма в канале разряда может рассматриваться как изотермическая, если выполняются следующие основные условия:

1. Стационарное распределение концентрации возбужденных атомов и ионов по уровням отвечает формуле Больцмана

$$N_i = \frac{g_i}{g_0} N_0 e^{\frac{-eV_i}{kT}}, \quad (4.4)$$

где N_i — число ионов, находящихся на i -м уровне, N_0 — общее число возбужденных атомов, g_i, g_0 — статистические веса ионов и атомов, e — заряд электронов, V_i — потенциал ионизации.

2. Концентрация носителей заряда должна соответствовать формуле Саха

$$N_e = 2 \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_0} \right)^{1/2} \left(\frac{2\pi m}{h^2} \right)^{3/4} (kT)^{1/4} p^{1/2} e^{\frac{-eV_i}{kT}}. \quad (4.5)$$

3. Время установления стационарного состояния для возбуждения и ионизации должно быть малым по сравнению с длительностью разряда.

4. Время выравнивания температуры газа и электронной температуры должно быть малым по сравнению с длительностью разряда.

Мандельштам С. Л. и Суходрев Н. К. показали, что эти условия выполняются и для случая импульсного разряда. Время установления равновесного состояния возбужденных атомов и ионов, а также выравнивания температуры газа и температуры электронов, согласно их данным, составляет около 10^{-7} с. Если учесть, что концентрация электронов в начальных стадиях разряда может быть выше 10^{17} см⁻³, то время установления

примерного равенства $T_{\text{эл}}$ и $T_{\text{г}}$ будет, очевидно, еще меньше. Следовательно, для времени существования тока много больше 10^{-7} с плазма канала импульсного разряда может характеризоваться как изотермическая. Таким образом при длительностях импульса больше 10^{-6} с для приближенных качественных оценок может быть использована теория стационарной изотермической плазмы, развитая в работах Эленбасса и других. В этом случае разряд, не ограниченный стенками, имеет форму эллипсоида вращения, вытянутого вдоль большой оси.

Пользуясь изложенным, рассмотрим приближенно баланс энергии в канале разряда. Электрический и тепловой режимы разряда определяются мощностью, выделяемой в столбе, массой газа и диаметром разрядного пространства. Поскольку мощность разряда, масса газа и диаметр разрядного пространства изменяются во времени, для упрощения будем пользоваться их усредненными или мгновенными значениями.

Исходя из сказанного выше, баланс мощности в единице длины столба разряда может быть записан (для $t = t_1$):

$$P_C = P_U + P_T, \quad (4.6)$$

где P_C — средняя мощность в единице длины столба разряда, выделенная к моменту времени, P_U — потери на излучение, P_T — потери на теплопроводность.

Мощность излучения резко возрастает с ростом мощности, выделяющейся в столбе разряда.

Вследствие того, что температура газа на оси разряда возрастает с увеличением P_C медленно, медленно возрастает и P_T . Без существенной ошибки в первом приближении можно положить либо $P_T = \text{const}$, либо $P_T = C_I P_C$, где C_I — постоянная величина меньше единицы.

Так как перенос тока в столбе разряда осуществляется главным образом электронами, для плотности тока в разряде можно записать

$$J = N_e e k_b E_{\text{П}}, \quad (4.7)$$

где J — плотность тока, N_e — концентрация электронов, k_e — подвижность электронов, e — заряд, E_{Π} — градиент потенциала вдоль столба разряда.

Величины P , k_e и n могут быть выражены:

$$P = nkT, \quad (4.8)$$

$$k_e = \frac{C_2}{n\sqrt{T}}, \quad (4.9)$$

$$n = C' = \frac{g_2}{TR^2}, \quad (4.10)$$

где P — давление в столбе, n — число частиц, заключенных в единице длины столба, g_2 — масса газа в единице длины столба, C' и C_2 — константы.

Пользуясь уравнением Саха (4.6), из уравнения (4.7) для плотности тока получаем выражение:

$$J = \text{const} \cdot g_2^{-1/2} R^3 E_{\Pi} T_{\text{эф}}^{1/4} e^{\frac{-eV_i}{2kT_{\text{эф}}}}. \quad (4.11)$$

В связи с тем, что множитель $T_{\text{эф}}^{1/4}$ меняется медленно по сравнению с $-\frac{eV_i}{2kT_{\text{эф}}}$, его изменением можно пренебречь и включить в постоянную:

$$J = \text{const} \cdot g_2^{-1/2} R E_{\Pi} e^{\frac{-eV_i}{2kT_{\text{эф}}}}. \quad (4.12)$$

В соответствии с допущением, что средняя плотность тока внутри канала остается постоянной для среднего тока в момент времени $t = t_1$, можно записать:

$$I = \text{const} \cdot g_2^{-1/2} R^3 E_{\Pi} e^{\frac{-eV_i}{2kT_{\text{эф}}}}. \quad (4.13)$$

Исходя из этого, для средней мощности на единицу длины столба разряда в данный момент времени получаем

$$P_C = \text{const} \cdot g_2^{-1/2} R^3 E_{\Pi}^2 e^{\frac{-eV_i}{2kT_{\text{эф}}}}. \quad (4.14)$$

Для мощности излучения единицы длины канала разряда получаем, согласно уравнению Больцмана,

$$P_U = \text{const} \cdot g_2 e^{\frac{-V_a}{kT_{\text{эф}}}}, \quad (4.15)$$

где V_a — некоторый средний уровень возбуждения.

Исключая из выражений (4.14) и (4.15) $T_{\text{эф}}$ и имея в виду, что $P_U = P_C - P_T$, получаем для градиента потенциала в столбе разряда выражение

$$E_{\Pi} = \text{const} \frac{g_2^{1/4 + \frac{V_i}{4V_a}}}{R^{3/2}} \cdot P_C^{1/2}. \quad (4.16)$$

Для прямоугольного импульса очевидно, что $P_C = \text{const}$ и, следовательно, $P_T = \text{const}$, а уравнение (4.16) принимает вид

$$E_{\Pi} = \text{const} \frac{g_2^{1/4 + \frac{V_i}{4V_a}}}{R^{3/2}}. \quad (4.17)$$

Полагая, что при $P_C = \text{const}$, $R \approx \text{const} \sqrt{t}$.

Если подставить это значение R в выражение (4.16), то получим

$$E_{\Pi} = \text{const} \cdot g_2^{1/4 + \frac{V_i}{4V_a}} \cdot t^{-3/4}. \quad (4.18)$$

Количественные расчеты по выражению (4.18) затруднены, так как отсутствуют сведения о количестве газа, заполняющем промежутки, и нет точных сведений о величине V_a . Однако качественное сравнение зависимости $E_{\Pi}(t)$ с экспериментом все же возможно. Оценка величины V_a для ряда случаев дает

$$\frac{1}{4} < \frac{V_i}{4V_a} < \frac{1}{3}.$$

Из формулы (4.16) можно получить выражение, связывающее градиент потенциала с током в разряде. Если положить, что $P_T = P_C \cdot C_I$, то после несложных преобразований связь E_{Π} с I принимает вид

$$E_{\Pi} = \text{const} \frac{g_2^m I^k}{R^n (1 - C_I)^{n/6}}, \quad (4.19)$$

где $m = \frac{V_a + V_i}{2V_a + V_i}$, $k = \frac{2V_a - V_i}{2V_a - V_i}$, $n = \frac{6V_a}{2V_a + V_i}$.

Оценка n и k в соответствии с оценкой V_a и V_i дает $n \cong 1,6-1,8$, $k \cong 1,4-1,5$.

Таким образом, величина градиента очень медленно меняется с током и существенно убывает с ростом радиуса канала или, другими словами, малые изменения радиуса канала вызывают большие изменения тока.

С ростом потерь тепла за счет теплопроводности возрастает и градиент. Это, в частности, позволяет объяснить наблюдающуюся на опыте зависимость градиента потенциала в столбе разряда от величины искрового промежутка при малых и больших значениях.

Очевидно, что при малых l_n согласно выражению (4.19) градиент должен быть выше, так как в этом случае потери на теплопроводность в тело электрода будут относительно больше. С увеличением промежутка, а следовательно, и с ростом общего запаса энергии в столбе удельный вес потерь на теплопроводность в тело электрода уменьшается, а также уменьшается и E_{Π} , поскольку растет величина $(1 - C_I)$ в формуле (4.19).

Напряжение на промежутке можно записать в следующем виде:

$$U_n = U_a + U_k + \text{const} \cdot l_n \frac{g_2^m I^k}{R^n (1 - C_I)^{n/6}}. \quad (4.20)$$

Из этого выражения следует, что при прочих равных условиях радиус канала будет расти с увеличением:

$$R = \text{const} \frac{\sqrt[n]{g_2^m I^k l_n}}{(U_n - U_a - U_k)^{1/n} (1 - C_I)^{1/6}}. \quad (4.21)$$

Рост диаметра канала, очевидно, вызовет и рост эффективного пятна нагрева на электродах и, следовательно, рост диаметра лунки. Рост радиуса канала не будет точно следовать закону $l_n^{1/n}$, так как с ростом l_n падает ток, поэтому радиус канала будет расти медленно.

Из приведенных соображений следует, что с ростом расстояния между электродами и ростом величины теплового источника на электродах должна уменьшаться глубина лунки при $U_{II} = \text{const}$, т. е. в этом случае падает величина коэффициента сосредоточенности источника, а следовательно, должна снизиться и величина эрозии.

4.3. Процессы на аноде

Для нашего случая можно считать, что электроны обладают максвелловским распределением скоростей.

Кинетической энергией, накопленной электронами при движении в столбе разряда, можно пренебречь, так как длина свободного пробега в плазме разряда в этом случае мала и составляет по порядку величины не более $10^{-5} - 10^{-6}$ см.

Поэтому, несмотря на относительно большие градиенты потенциала, падение напряжения на длине свободного пробега составляет доли вольта, т. е. на 1–2 порядка меньше анодного падения.

Исходя из этого, можно для энергии, перенесенной электронами на анод, записать

$$W_a^e = (U_a + \varphi)en_e, \quad (4.22)$$

где W_a^e — энергия, передаваемая электронами аноду, U_a — анодное падение напряжения, φ — работа выхода, n_e — число электронов, e — заряд электрона.

За время импульса t_u энергия, передаваемая электронами аноду, очевидно равна

$$W_a^e = (U_a + \varphi) \int_c^{t_u} I(t) dt. \quad (4.23)$$

Энергия, передаваемая аноду излучением, определяется по закону Стефана—Больцмана выражением:

$$W_a^u = \delta \varepsilon \sigma T_{\text{эф}} s t_u, \quad (4.24)$$

где δ — коэффициент поглощения света поверхностью металла, ε — коэффициент черноты плазмы, σ — постоянная Стефана—Больцмана ($5,673 \cdot 10^{-5}$ эрг/см² с⁻¹⁰ град⁴), s — площадь излучателя, t_u — длительность импульса.

В связи с тем, что некоторое время после окончания импульса тока между электродами сохраняется объем нагретого до высоких температур газа, можно ожидать, что в последней стадии разряда и некоторое время спустя может существовать термическая (газокинетическая) бомбардировка поверхности электрода.

Оценим эту величину из газокинетических соображений. Плотность кинетической энергии газа при нагреве до температуры T_r может быть представлена выражением:

$$\omega_T = \frac{1}{2} \eta n k T_r - \frac{1}{2} \eta n k T_0 = \frac{1}{2} \eta (P - P_0), \quad (4.25)$$

где ω_T — энергия теплового движения газа, η — число степеней свободы, n — число частиц в объеме газа, T_r — температу-

ра газа, T_0 — начальная температура, P — давление при T , P_0 — начальное давление.

В нашем случае давление газа является функцией времени, но поскольку нас интересует оценка порядка величины энергии теплового движения частиц газа, передаваемой электродом, $P(t)$ может быть упрощено, заменено некоторым $P_{\text{эф}}$.

Для общего количества теплового движения в объеме газа, соответствующего объему столба разряда, можно записать

$$W_T = \frac{1}{2} \eta (P_{\text{эф}} - P_0) V_c, \quad (4.26)$$

где W_T — энергия движения газа в объеме V_c , равном объему столба разряда.

Электроду передается только часть этой энергии. Если считать газ, заполняющий промежуток, одноатомным, а электроды при рассмотрении тепловой бомбардировки равноправными, то на единицу поверхности анода приходится энергия

$$W_a^T = b^{3/2} (P_{\text{эф}} - P_0), \quad (4.27)$$

где b — коэффициент передачи энергии, величина которого зависит от типа соударений частиц с поверхностью электродов, $0 < b \leq 1$.

Оценим количество энергии, получаемой анодом за счет торжества на его поверхности факела, образующегося на катоде.

Многочисленные экспериментальные данные различных авторов (Золотых, Мандельштам, Воронцов и др.) показывают, что во время существования импульса тока с электродов выделяются факелы паров металла.

Выделение паров металла с анода и катода существенно отличается как по скорости движения факелов, так и по структуре.

Как следует из теории теплообмена, поток тепла, передаваемый единице поверхности газом, тормозящимся на жесткой стенке, составляет величину

$$q_{\Gamma} = \alpha(T^* - T_{\Pi}), \quad (4.28)$$

где q_{Γ} — поток тепла, подводимый из пограничного слоя к стенке, α — коэффициент теплоотдачи, T^* — температура торможения, T_{Π} — температура поверхности, о которую тормозится газ.

Температура торможения из гидродинамических соображений определится так:

$$T^* = T_{\Gamma} \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right), \quad (4.29)$$

где T_{Γ} — температура газа, $k = C_p / C_v$, M — число Маха.

Для турбулентного потока коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \frac{1}{2} C_p \rho_{\Gamma} V_{\Gamma} k_f, \quad (4.30)$$

ρ_{Γ} — плотность газа, V_{Γ} — скорость газа, k_f — коэффициент трения, определяется экспериментально, C_p — теплоемкость при постоянном давлении.

Считая температуру газа постоянной и равной некоторому эффективному значению на основании формул (4.28)–(4.30) для полного количества энергии, передаваемого факелом поверхности анода, получаем

$$W_a^{\Phi} = \frac{A}{2} C_p \rho_{\text{кф}} V_{\text{кф}} k_f \{T_{\Phi} \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right) - T_{\Pi}\} s_a t_{\Phi}. \quad (4.31)$$

Здесь A — механический эквивалент теплоты, $\rho_{\text{кф}}$ — плотность катодного факела, $V_{\text{кф}}$ — скорость катодного факела, T_{Φ} — температура факела, s_a — площадь поверхности, на которой тормозится факел, t_{Φ} — время действия факела.

На основании формул (4.22), (4.23), (4.27) и (4.31) находим общее количество энергии, получаемой анодом в течение импульса,

$$W_a = W_a^e + W_a^u + W_a^T + W_a^{\Phi}. \quad (4.32)$$

Пользуясь изложенным, оценим порядок величины членов, входящих в первую часть выражения (4.32). Эффективная работа выхода из металла составляет $\gamma = 4,5\text{--}5$ В. Согласно экспериментальным данным величина анодного падения напряжения составляет $\gamma_a = 8\text{--}10$ В. Осциллографические измерения показали, что импульс тока в подобных условиях достаточно хорошо можно аппроксимировать полусинусоидой с соответствующей конкретному случаю амплитудой и периодом. Производя подсчет по формуле (4.23) и подставляя приведенные значения U_a , γ , $I_{\text{макс}}$, получаем для $W_u = 0,16$ Дж и $t_u = 19$ мкс оценку величины W_a^e : $W_a^e = (9\text{--}10) \cdot 10^{-2}$ Дж для $I_n = 2\text{--}3$ мкА и $W_a^e = (3\text{--}4) \cdot 10^{-2}$ Дж для $I_n = 40$ мкА.

Произведя аналогичные оценки для W_a^u , W_a^T и W_a^Φ , можно установить, что для указанных выше условий $W_a^u \approx (3\text{--}7) \cdot 10^{-3}$ Дж, $W_a^T \approx 10^{-3}$ Дж, $W_a^\Phi \approx 10^{-2}\text{--}10^{-3}$ Дж.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что основная часть энергии на анод передается механизмом электронной бомбардировки. Энергия, передаваемая аноду излучением и газокINETической (термической) бомбардировкой, незначительна и может не учитываться в расчетах.

В том случае, когда точки кипения материалов, из которых изготовлены анод и катод, существенно отличаются, т.е. когда точка кипения материала катода существенно выше, может иметь некоторое значение обмен энергии за счет факелов. Этот фактор становится особенно заметным для коротких импульсов ($t_u = 10^{-6}$ с).

4.4. Процессы на катоде

Характер процессов выделения энергии на катоде существенно отличается от аналогичных процессов на аноде. Здесь, наряду с ионным, существует и электронный ток, который дол-

жен учитываться в энергетическом балансе. Структура анодного и катодного пятен существенно различна. На различие структуры пятен обращали внимание многие исследователи. Однако наиболее интересными являются результаты, полученные при фотографировании катодного пятна с экспозицией 10^{-7} с. По этим данным, пока плотность тока не превышает 10^6 А/см², существует одно пятно весьма малых размеров (диаметр пятна ~ 6 мкм).

С ростом тока число мелких пятен увеличивается, причем плотность тока остается постоянной и имеет порядок 10^6 А/см². Время жизни пятна составляет около $3 \cdot 10^{-6}$ с. Другими словами при токах, порядка 10^2 – 10^3 А, на катоде существует некоторое количество пятен малых размеров, причем их число в каждый момент соответствует условию $j = \text{const}$.

Следовательно, с тепловой точки зрения область на поверхности электрода, внутри которого возникают в процессе протекания тока катодные пятна, может рассматриваться как плоский источник тепла, представляющий суперпозицию некоторого количества точечных источников тепла.

Рассмотрим возможные механизмы передачи энергии поверхности катода:

- а) ионная бомбардировка поверхности катода,
- б) передача тепла катоду излучением,
- в) термическая (газокинетическая) бомбардировка поверхности,
- г) обмен энергией за счет торможения на поверхности катода факела, возникающего на аноде.

Энергия, передаваемая ионами катоду, может быть представлена в виде

$$W_k^i = \alpha W_i^k + W_i^H, \quad (4.33)$$

W_i^k — кинетическая энергия иона, W_i^H — энергия нейтрализации, α — коэффициент аккомодации.

Под кинетической энергией иона понимают энергию, приобретаемую ионом при движении в зоне катодного падения.

Поскольку в отношении газокинетической и лучистой энергии анод и катод равноправны, то из оценки, сделанной ранее для анода и катода, можно заключить, что эти виды передачи энергии не играют существенной роли и ими можно пренебречь.

Передача энергии катода посредством торможения факела с анода также незначительна, поскольку скорость вылета паров с анода по полученным экспериментальным данным меньше звуковой и, следовательно, доля тепла, передаваемая факелом с анода катоду, мала.

Таким образом, единственным и наиболее существенным источником энергии, аккумулирующейся на катоде, является ионная бомбардировка. Оценка величины W_i^k , проведенная с учетом ряда допущений, дает для условий разряда $W_u = 0,16$ Дж и $t_u = 19$ мкс следующие величины: $W_i^k = (2-3) \cdot 10^{-2}$ Дж для $l_n = 2-3$ мкм и $W_i^k = 10^{-2}$ Дж для $l_n = 40$ мкм.

Приведенные рассуждения показывают, что основными процессами, обуславливающими передачу энергии электродам, являются электронная и ионная бомбардировка. Другие рассмотренные факторы играют второстепенную роль.

В зависимости от условий роль факельного механизма передачи энергии аноду может оказаться существенной.

4.5. Тепловые процессы на поверхности электродов при электроискровой обработке материалов

В 1947 г. Б. Н. Золотых была предложена гипотеза о механизме эрозии металлов под действием импульсного электрического разряда в жидкой диэлектрической среде.

В настоящее время в свете большого количества экспериментальных данных можно считать, что предложенная гипо-

теза достаточно верно отражает картину механизма электрической эрозии металлов в указанных условиях. В связи с этим большой интерес представляет возможность обосновать выдвинутые положения путем количественного математического расчета: необходимо провести анализ некоторых количественных закономерностей, наблюдаемых в условиях типовых режимов обработки, связанных с тепловыми процессами на электродах.

Процесс распространения тепла от плоского источника, создаваемого импульсом на поверхности электрода, сопровождается переходом металла из твердого состояния в жидкое, с поглощением скрытой теплоты плавления на границе агрегатного превращения. При решении задачи теплопроводности для определения объема расплавленной лунки можно учесть этот процесс введением так называемой приведенной температуры плавления.

$$T^* = T_{\text{п}} + \frac{Q_c}{C}, \quad (4.34)$$

где T^* — приведенная температура плавления металла, $T_{\text{п}}$ — истинная температура плавления металла, C — удельная теплоемкость металла, Q_c — скрытая удельная теплота плавления.

Это допущение и ряд других, связанных с необоснованным распространением исследований механизма расширения канала высоковольтного искрового разряда на случай пробоя в малых промежутках, имеющих место при электроискровой обработке, привело к большому расхождению расчета с результатами эксперимента эрозии металла в реальных условиях электроискровой обработки.

Между тем, при помощи ряда физически обоснованных допущений может быть предложен сравнительно простой метод решения задачи о плавлении металла под действием нестационарного плоского источника тепла.

Измерения размеров лунок, образующихся на электродах под действием импульсов тока, показывают, что для основных

диапазонов изменений электрических характеристик импульсов глубина лунки составляет не более 0,1–0,2 ее диаметра. Это позволяет при рассмотрении процесса распространения тепла от центра источника в глубь металла в первом приближении пренебречь радиальным рассеянием тепла. При таком допущении задача становится одномерной.

Введем понятие о некоторой эффективной температуре \bar{T} на поверхности источника в его центре. Для случая $\bar{T} > T_{\text{п}}$, где $T_{\text{п}}$ — температура плавления металла, процесс распространения тепла связан с изменением агрегатного состояния вещества плавлением и описывается системой двух уравнений (задача Стефана):

$$\text{для жидкой фазы } T_1(x, t) = A_1 + B_1 \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_1 t}}\right), \quad (4.35)$$

$$\text{для твердой фазы } T_2(x, t) = A_2 + B_2 \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_2 t}}\right), \quad (4.36)$$

где A_1, B_1, A_2, B_2 — постоянные, определяемые из граничных условий, α_1 и α_2 — температуропроводности жидкой и твердой фаз, соответственно, erf — интеграл ошибок Гаусса или функция Крампа.

Краевые условия для рассматриваемого случая имеют вид:

$$1) \quad T_2(x, 0) = T_0, \text{ где } T_0 \text{ — начальная температура тела.}$$

$$2) \quad T_1(0, t) = \bar{T}.$$

$$3) \quad T_2(\infty, t) = T_0.$$

$$4) \quad T_1(\xi, t) = T_2(\xi, t) = T_{\text{п}}.$$

$$5) \quad -\lambda_1 \frac{dT_1(\xi, t)}{dx} = \lambda_2 \frac{dT_2(\xi, t)}{dx} - \rho Q_c \frac{d\xi}{dt}, \text{ где } \xi = f(t) \text{ — текущая}$$

координата по оси X , определяющая положение границы плавления в данный момент времени; λ_1 и λ_2 — теплопроводность жидкой и твердой фаз соответственно.

Определяя постоянные из граничных условий, получаем систему уравнений, описывающих распределение температуры вдоль оси лунки.

Для расплавленного металла

$$T_1(x, t) = \bar{T} - \frac{(\bar{T} - T_{\pi}) \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{\alpha}{2\sqrt{a_1}}\right)}. \quad (4.37)$$

Для твердой фазы

$$T_2 = T_0 + \frac{(T_{\pi} - T_0) \{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_2t}}\right)\}}{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\alpha}{2\sqrt{a_2}}\right)}. \quad (4.38)$$

Перемещение границы раздела фаз определится из уравнения

$$\xi = \alpha(t), \quad (4.39)$$

где d — коэффициент пропорциональности, характеризующий скорость перемещения границы раздела фаз. Определяется из условия на границе фазового превращения

$$\frac{\lambda_1(\bar{T} - T_{\pi})}{\operatorname{erf}\left(\frac{\alpha}{2\sqrt{a_1}}\right)\sqrt{a_1}} e^{\frac{-\alpha^2}{4a_1}} - \frac{\lambda_2(T_{\pi} - T_0)}{\{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\alpha}{2\sqrt{a_2}}\right)\}\sqrt{a_2}} e^{\frac{-\alpha^2}{4a_2}} = \rho Q_c \alpha \frac{\sqrt{\pi}}{2}. \quad (4.40)$$

Установим связь между эффективной температурой T_{π} и плотностью энергии ω , поступающей в электрод из канала разряда в центр источника

$$\omega_0 = \int_0^{t_u} q(t) dt, \quad (4.41)$$

$q(t)$ — интенсивность источника тепла в центре, t_u — длительность импульса.

$$q(t) = -\lambda_1 \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0}. \quad (4.42)$$

Подставляя значение T в выражение (4.42) из (4.37), имеем

$$q(t) = \lambda_1 \frac{\bar{T} - T_{\text{н}}}{\operatorname{erf}\left(\frac{\alpha}{2\sqrt{a_1}}\right) \sqrt{a_1 t_u \pi}}, \quad (4.43)$$

откуда

$$\omega_0 = \lambda_1 \frac{(\bar{T} - T_{\text{н}}) 2\sqrt{t_u}}{\operatorname{erf}\left(\frac{\alpha}{2\sqrt{a_2}}\right) \sqrt{a_1 \pi}}. \quad (4.44)$$

Уравнение (4.40) для данного металла с определенными теплофизическими константами устанавливает зависимость

$$\alpha = f_1(\bar{T}). \quad (4.45)$$

Уравнение (4.44) устанавливает зависимость

$$\frac{\omega_0}{\sqrt{t_u}} = f_2(\alpha). \quad (4.46)$$

Решая уравнения (4.40) и (4.46) совместно, получим

$$h_{\Lambda} = f_3(\omega_0, t_u), \quad (4.47)$$

где $h_{\Lambda} = \alpha\sqrt{t_u}$ — глубина лунки.

Так как мы пренебрегли зависимостью теплофизических констант от температуры, то расчетные величины глубины лунки будут больше экспериментальных (см. табл. 4.2).

Измерения показывают, что форма лунки близка к шаровому сегменту, причем $h_{\Lambda} < d$, где d — диаметр лунки.

Таблица 4.2

Вычисленные и экспериментально измеренные размеры лунок
для различных материалов

Материал	W_u , Дж	t_u , мкс	h_Λ , мкм	
			расчет	опыт
Медь	0,5	200	55	50
	1,0	200	69	65
	2,0	200	91	80
Железо	0,5	335	50	42
	1,0	335	60	54
	2,0	335	78	60

В этом случае объем лунки V может быть выражен

$$V = Ah_\Lambda^2, \quad (4.48)$$

где A — коэффициент, характеризующий радиус кривизны лунки.

При этих условиях

$$V = Af_3^2(\omega_0, t_u). \quad (4.49)$$

Методом скоростной съемки установлено, что диаметр канала разряда в широком диапазоне длительности импульсов постоянной энергии изменяется в незначительных пределах.

В соответствии с этим для неизменной энергии импульса $W_u = \text{const}$ можно положить $\omega_0 = \text{const}$. При этом условии выражение (4.49) приобретает вид:

$$V = Af_3^2(\omega_0, t_u) \mid \omega_0 = \text{const} - \varphi(t_u) \mid \omega_0 = \text{const}. \quad (4.50)$$

Таким образом, при использовании указанного метода могут быть построены графики $V = \varphi(t_u) \mid \omega_0 = \text{const}$ для ряда чистых металлов.

Пользуясь решением задачи Стефана, можно получить приближенное выражение для объема лунки:

$$V_\Lambda = \frac{1}{8} \alpha^3 \sqrt{t_u} \frac{W_u}{\omega_0 a}, \quad (4.51)$$

где α — величина, определяемая из решения задачи Стефана, W_3 — энергия, переданная источнику тепла, ω_0 — плотность энергии в центре источника, a — теплопроводность.

Выражения (4.47) и (4.51) являются более удобными для расчета, так как необходимые для этого значения t_u , соответствующие максимальному значению эрозии γ , известны из эксперимента для широкого круга материалов, а значения $\omega_0/t_u = B_0$ для этого случая могут быть получены из решения задачи Стефана.

Значения B_0 для некоторых материалов и сплавов имеют следующую величину (табл. 4.3).

Таблица 4.3

Значения B_0 для некоторых материалов и сплавов

Материал анода	Al	ст. 45	Железо АРМКО	W	ВК-6	Ni
B_0	775	800	900	1200	4400	600

Пользуясь задачей Стефана, можно рассчитать некоторые экспериментально наблюдаемые зависимости ($\gamma = f(t_u)$ и $\gamma = f(W_u)$). Однако, если величина h_Λ может быть получена относительно точно и для количественных расчетов требуется использование опытных данных о величинах t_u , соответствующих максимуму эрозии (при данном $W_u = \text{const}$), то количественный расчет V_Λ затруднителен, так как W_3 независимым способом может быть определено для весьма ограниченного числа случаев. Несмотря на это, решение задачи Стефана может быть использовано для приближенных методов расчета характеристик процесса электрической эрозии.

Пренебрежение температурной зависимостью α и C приводит к ошибкам в определении T^* и, следовательно, к ошибкам в определении параметров лунки (α — теплопроводность, C — теплоемкость, T^* — приведенная температура плавления). Например, относительная ошибка в определении V_Λ для меди составляет 10 %, для стали — 20 %, никеля — 30 %, алюминия — 50 %.

Таким образом, наиболее близкое к действительности математическое описание тепловых процессов, обуславливающих ход процесса эрозии при электроискровой обработке, может быть получено на базе решения задачи Стефана для данного конкретного случая. Однако, весь комплекс процессов, обуславливающих эрозию металла под действием импульсного разряда, не исчерпывается рассмотренным. Тепловые и энергетические процессы не дают ответа о природе сил, под действием которых металл удаляется с электродов. Необходимо рассмотреть гидродинамические процессы в искровом промежутке.

4.6. Гидродинамические процессы в межэлектродном промежутке

Накопленный к настоящему времени экспериментальный материал не оставляет никаких сомнений в том, что нестационарные гидро- и газодинамические процессы, развивающиеся в промежутке, имеют существенное значение как для развития разряда, так и для процесса эрозии. Анализ этих процессов может дать много данных для ясного понимания физического смысла явлений, протекающих при импульсном разряде.

Результаты скоростной съемки импульсного разряда в жидкости (длина промежутка десятки и сотни микрон) показывают, что после того как ударная волна отошла от канала разряда на расстояние, во много раз превосходящее радиус канала, в промежутке и близлежащем пространстве формируется газовый пузырь. После того как газовый пузырь, расширяясь, достигает некоторой максимальной величины, он начинает сжиматься и, наконец, схлопывается. Время расширения и существования газового пузыря существенно (на порядок и более) превосходит время существования тока. Следовательно, расширение газового пузыря определяется не только поступлением энергии в канал разряда, но и рядом других факторов.

На основании данных скоростной съемки установлено, что даже после окончания импульса тока внутрь газового пузыря с электродов поступают пары металла. Т. е. по закону расширения газового пузыря существенное влияние должно оказывать и поступление в полость пузыря массы газов (паров), несущих определенный запас энергии.

Вследствие этого, в общей постановке задача о гидравлических процессах, связанных с развитием и движением газового пузыря, распадается на две самостоятельные, но взаимосвязанные задачи:

1. Движение жидкости вне газового пузыря, начиная с его границы.

2. Движение газа внутри газового пузыря.

Для решения первой задачи необходимо иметь представление о законе движения границы газового пузыря. Эти сведения может дать либо решение второй задачи, либо эксперимент.

Решение второй задачи представляет значительные трудности, поскольку в процессе расширения газового пузыря одновременно изменяются как энергия газа, так и его масса. Изменение массы газа, участвующего в расширении, определяется не только испарением жидкой среды и металла электродов, но и процессами конденсации паров металла на стенках газового пузыря. Изменение давления в любой точке пространства газового пузыря будет определяться не только изменением объема и температуры, в свою очередь нелинейно зависящие от времени, но и изменением парциального давления паров металла в данной точке, определяющегося процессами испарения и конденсации. Следовательно, при решении задачи для внутренней полости газового пузыря к уравнениям движения непрерывности и переноса энергии необходимо присоединить еще уравнение концентрации паров металла.

Решение более простой задачи без учета массы и состава газа вызывает определенные затруднения. Положение усугубляется тем, что сведения о ряде характерных констант процесса (пара-

метр C_p/C_v и др.) отсутствуют и пока нет путей к их получению.

Другими словами, в настоящее время довести решение до численных значений практически невозможно. В связи с этим в случае, когда потребуются сведения о законе движения газового пузыря с учетом экспериментальных данных и в общей постановке, рассматривают только первую задачу.

4.7. Задача о расширении и схлопывании газового пузыря

Для случая, когда размеры электродов в направлении, перпендикулярном оси канала, велики по сравнению с радиусом канала разряда, задача имеет цилиндрическую симметрию. Для случая, когда размеры электродов в заданном направлении малы или сравнимы с радиусом канала разряда, а длина его меньше или сравнима с радиусом, задача имеет шаровую симметрию.

Для упрощения и поскольку нас интересуют, главным образом, качественные выводы, рассмотрим случай шаровой симметрии, который бывает в условиях при относительно малых размерах электродов.

Задачу можно сформулировать в следующем виде.

1. Внутри жидкости по произвольному закону расширяется сфера. Определить давление $P(t)$ на поверхности сферы и время ее расширения $\tau_{\text{расш}}$.

2. Внутри жидкости имеется шаровая полость, которая уменьшается по закону $R(t)$, причем при некотором $t = \tau_{\text{схл}}$, $R(\tau_{\text{схл}}) = 0$. Определить время схлопывания $\tau_{\text{схл}}$ без учета вязкости для несжимаемой жидкости. Эта задача при шаровой симметрии описывается уравнением Эйлера и уравнением непрерывности в виде

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r}, \quad (4.52)$$

$$r^2 v = F(t). \quad (4.53)$$

Здесь v — скорость жидкости, r — текущий радиус-вектор, ρ — плотность, $P(t)$ — давление, $F(t)$ — некоторая функция времени. Решение этой системы уравнений при условии $v(r) \neq 0$, $r = R(t)$, $v(\infty) = 0$, $P(\infty) = P_0$, $P(R) = P(t)$ и пределах интегрирования от $r = R(t)$ до ∞ дает для $P(t)$ и $\tau_{\text{расш}}$ выражения

$$P(t) = P_0 + \frac{\rho}{2} \left[3 \left(\frac{\partial R}{\partial t} \right)^2 + 2R \frac{\partial^2 R}{\partial t^2} \right], \quad (4.54)$$

$$\tau_{\text{расш}} = R_{\text{max}} \sqrt{\frac{2\rho}{3P_0}}, \quad (4.55)$$

R_{max} — максимальное значение газового пузыря.

Решение системы уравнения (4.52) и (4.53) при условии $r = R(t)$, $v(\infty) = 0$, $P(\infty) = P_0$, $P(R) = 0$ дает выражение для времени схлопывания газового пузыря

$$\tau_{\text{схл}} = \sqrt{\frac{3\rho}{2P_0}} \int_0^{R_{\text{max}}} \frac{dR}{\sqrt{\frac{R_{\text{max}}^3}{R} - 1}} = 0,915 R_{\text{max}} \sqrt{\frac{\rho}{P_0}}. \quad (4.56)$$

Рассматривая процесс расширения газового пузыря после окончания импульса тока как адиабатический и полагая, что состояние газа внутри пузыря описывается упрощенным уравнением Ван-дер-Ваальса, для R_{max} можно получить выражение

$$R_{\text{max}} = \sqrt[3]{\frac{3K(W_c + W_T)}{4\pi P_0}}, \quad (4.57)$$

где K — некоторый коэффициент ($K < 1$), W_c — энергия столба разряда, W_T — энергия, перенесенная парами металла, $P_0 = P_{\infty}$. В первом приближении при $l_n = \text{const}$

$$K(W_c + W_T) = K^* W_u \quad (4.58)$$

и уравнение (4.57) можно переписать в виде

$$R_{\max} = \sqrt[3]{\frac{3K^*W_u}{4\pi P_0}}. \quad (4.59)$$

Как показывают данные скоростной съемки при $t_u = (10^{-5} - 10^{-4})$ с и $W_u = (10^{-2} - 1)$ Дж, $K^* = (10^{-2} - 1, 1 \cdot 10^{-1})$.

Пользуясь данными скоростной съемки для определения, dR/dt и d^2R/dt^2 для различных моментов времени при помощи уравнения (4.54), можно получить кривую $P(t)$ (рис. 4.2).

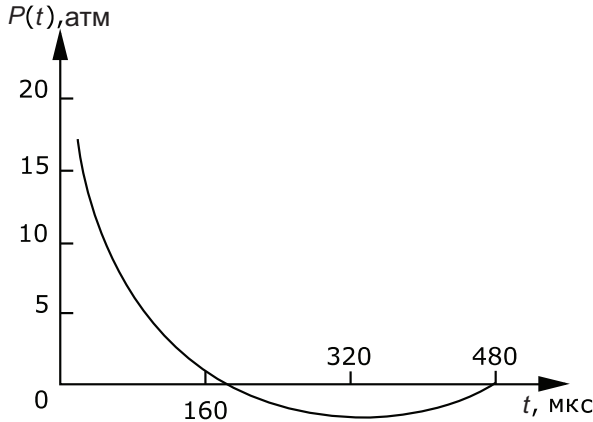


Рис. 4.2. Зависимость $P(t)$ на границе газового пузыря, полученная расчетом с использованием данных скоростной съемки

Как показывает опыт (см. рис. 4.3), закон расширения газового пузыря может быть представлен в виде

$$R(t) = R_{\max} \sqrt{1 - 4\left(\frac{t^*}{T}\right)^2}, \quad (4.60)$$

где $t^* = t - T/2$.

Кроме того, по данным эксперимента можно считать $\tau_{\text{расш}} \approx \tau_{\text{схл}}$. Это, вероятно, объясняется тем, что в момент схлопывания $P_0 \neq 0$, как это было принято при решении задачи.

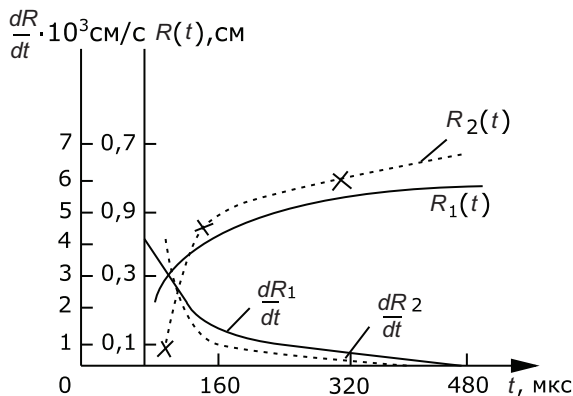


Рис. 4.3. Экспериментальные данные для расширения газового пузыря

Для дальнейшего интересно определить момент времени $t_{\text{зап}}$, при котором давление на границе газового пузыря $P(t)$ имеет минимум. Пользуясь уравнениями (4.54), (4.55), (4.56), (4.57), можно получить приближенное выражение для

$$t_{\text{зап}} \approx 0,763 \sqrt{\frac{3KW_u}{4\pi P_0}} \sqrt{\frac{2\rho}{3P_0}}. \quad (4.61)$$

Это выражение справедливо для $t_u = \text{const}$, так как K^* и W_u являются функциями времени.

Глава 5. Механизм электрической эрозии металлов в жидкой диэлектрической среде

Условия сохранения аддитивности интегральной величины эрозии подробно исследовались некоторыми авторами.

В работах Б. Р. Лазаренко и Б. Н. Золотых было отмечено, что интегральный эффект эрозии от серии импульсов является аддитивным по отношению к единичному акту эрозии. Это свойство имеет принципиальное значение, поскольку познание закономерностей эрозии в единичном импульсе означает познание общих закономерностей, управляющих процессом эрозии в реальных условиях электроискровой обработки.

Из простых соображений ясно, что аддитивность процесса эрозии будет соблюдаться, если будет выполняться равенство

$$\gamma = \sum_{i=1}^n \gamma_i, \quad (5.1)$$

где γ — величина эрозии в единичном i -м импульсе при условии, что действие одного импульса не накладывается на предыдущий и действие последующего на данный.

Для экспериментальной проверки условия аддитивности была использована схема, которая давала парные импульсы, следующие с частотой 50 Гц. Для изучения взаимного влияния импульсов время между ними менялось от перекрытия их

друг другом до 400 мкс, т. е. при длительности импульса 13 мкс скважность изменялась от < 1 до 30.

На рис. 5.1 представлена зависимость эрозии электродов от скважности. При скважности импульсов, равной 1 (т. е. при полном или частичном перекрытии), величина эрозии, рассчитанная на 1 импульс, максимальна.

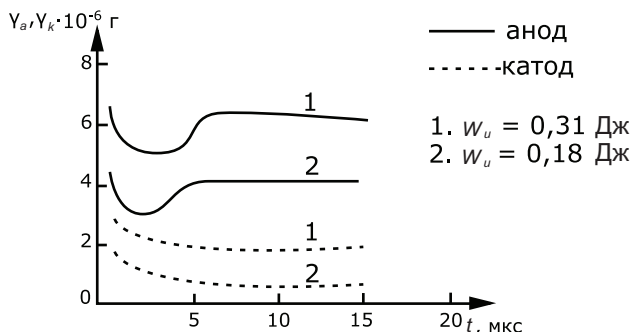


Рис. 5.1. Зависимость эрозии электродов от скважности

Это объясняется тем, что через промежуток фактически проходит импульс удвоенной длительности и удвоенного запаса энергии. Если учесть, что при $W_u \approx 10^{-1}$ Дж максимальное значение эрозии медных электродов достигается при $t_u = 60-70$ мкс, то увеличение эрозии становится ясным. Однако этот режим работы неприемлем для практики, так как при непрерывном следовании импульсов с частотой $f = 1/(nt_u)$ при $n < 1$ разряд перейдет в стационарную дугу, а вместе с этим исчезнет и возможность размерной обработки. При увеличении скважности импульсов до 2 (для данных условий опыта) величина эрозии падает и достигает минимума. Это объясняется следующими обстоятельствами. При относительно малых значениях скважности разряд проходит через газы и пары, заключенные в газовом пузыре, образованном предшествующим импульсом. В этом случае, за счет более значительного расширения канала разря-

да в газе, плотность энергии в катодном и анодном пятнах падает, а вследствие этого падает и величина эрозии.

С увеличением паузы растет и вероятность прохождения повторного пробоя через жидкость и, следовательно, растет величина эрозии, поскольку часть повторных импульсов протекает в нормальных условиях. После достижения некоторой паузы (в данных условиях $n = 4-5$) эрозия достигает своей нормальной (для данных t_u и W_u) величины и далее остается постоянной.

Приведенные данные показывают, что необходимым и достаточным условием соблюдения принципа аддитивности является взаимная независимость действия импульсов. Другими словами, существует предельно допустимая скважность импульсов n_0 , при которой сохраняется принцип аддитивности.

Сохранение принципа аддитивности есть необходимое и достаточное условие осуществления размерной электроискровой обработки в оптимальных условиях. Величина n_0 зависит от W_u и t_u и гидродинамических характеристик промежутка. Общей методики расчета n_0 пока нет, но качественная оценка их гидродинамических характеристик может быть сделана на основе анализа гидродинамических процессов в промежутке.

На основании данных скоростной и рентгеноимпульсной съемки установлено, что время выброса металла из лунки соответствует моменту достижения минимума давления в газовом пузыре. Следовательно, в части выброса металла в жидкой фазе действие двух импульсов будет независимым, если пауза между ними будет не менее времени запаздывания выброса ($t_{\text{зап}}$). Это время можно оценить, пользуясь формулой (4.61). Расчет дает следующие данные (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Расчетные значения для времени запаздывания,
полученные по формуле (4.61)

W_u , Дж	1,0	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}
$t_{\text{зап}}$, мкс	120	56	26	12	5,6

Приведенные данные расчета по порядку величин достаточно хорошо совпадают с опытом. Так, для $t_u = 185$ мкс, $W_u = 2,5$ Дж из опыта $t_{\text{зап}} = (4-5) \cdot 10^2$ мкс, для $t_u = 13$ мкс, $W_u = 0,4$ Дж — $t_{\text{зап}} = 50-60$ мкс.

Иногда в качестве аргумента против правомерности использования принципа аддитивности для описания интегрального процесса эрозии ссылаются на то, что величина γ_i подвержена статистическому разбросу, закон распределения γ_i неизвестен и практически не поддается определению. Основной причиной разброса γ_i при прочих равных условиях является разброс величины искрового промежутка l_n , влекущий за собой разброс величины энергии, выделившейся на электродах.

Экспериментально установлено, что среднеквадратичная величина отклонения l_n от наиболее вероятной составляет не более 10–15 % и закон распределения l_n подчиняется закону Гаусса. Следовательно, и отклонение в величине эрозии подчиняется этому закону. Как показал опыт, величина γ_i , полученная в условиях единичного импульса, также отличается от γ_i , полученной в реальных условиях, не более чем на 10–15 %.

Таким образом, данные, полученные в условиях единичных импульсов при величине промежутка, равной наивероятнейшему значению для данного напряжения импульса, могут быть обобщены и на интегральный процесс эрозии в реальных условиях. Естественно, в этом случае прочие условия (температура, гидродинамические характеристики промежутка и др.) должны сохраняться.

5.1. Данные скоростной рентгеноимпульсной съемки

Метод скоростной и рентгеноимпульсной съемки дал возможность получить более обширные сведения о динамике развития процесса эрозии в единичном импульсе и более или менее ясно представить его качественную картину.

Результаты скоростной съемки показывают, что практически с начала импульса тока развивается испарение металла электродов, которое в первой половине носит спокойный и диффузионный характер. Одновременно с этим формируется газовый пузырь. К концу импульса испарение резко меняет свой характер и принимает вид факелов или струй. К этому же времени объем металла, соответствующий объему лунки, прогревается до температуры, вероятно, близкой к температуре кипения, и границы лунки становятся ясно видимыми. Однако значительная часть металла (от 60 до 90 % в зависимости от характеристик импульса) остается невыброшенной из лунки, что подтверждается рентгеноимпульсной съемкой.

В последующие моменты времени выброс паров в виде факелов прекращается, а ранее выброшенные пары остывают, конденсируясь на границе газового пузыря. На более поздних стадиях развития процесса (300–500 мкс после начала импульса) из лунки формируется светящийся конус, который может быть отождествлен с потоком смеси капель и паров металла. К исходу 450–500 мкс лунка счищается.

Аналогичные результаты были получены и для других значений W_u и t_u , с той лишь разницей, что для меньших значений t_u доля металла, испаренного в течение импульса тока, больше и время запаздывания импульса изменяется. Так, для $t_u = 1–10$ мкс доля испаренного металла в зависимости от W_u может составить 30–50 %.

Подробный анализ рентгеновских снимков фаз развития газового пузыря позволяет получить ряд новых сведений. Такой анализ показывает, что плотность почернения пленки в зоне газового пузыря неоднородна. Так, на границе газового пузыря заметен ореол с меньшей плотностью почернения, свидетельствующий о большей плотности среды в этом месте. Плотность почернения растет от периферии к центру. В зоне разряда характер почернения отклоняется от указанного и почернение здесь меньше.

На рис. 5.2 и 5.3 представлены соответственно кривая давления $P(t)$ и кривая, характеризующая изменение плотности вещества $\rho(t)$ (в относительных единицах) в центральной части газового пузыря. Полученные данные можно истолковать следующим образом. В первой фазе развития разряда происходит испарение некоторого количества металла с поверхности электродов, которое ко времени 100 мкс достигает границы газового пузыря и частично конденсируется на его поверхности, вызывая появление указанного ранее ореола. Испарение металла продолжается в течение импульса, вызывая рост ореола вокруг газового пузыря.

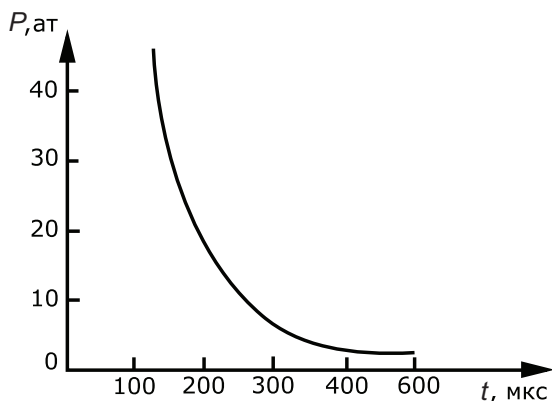


Рис. 5.2. Зависимость давления P от времени по данным рентгеновской съемки

Интенсивность испарения после перехода тока через максимум падает, а интенсивность конденсации растет. Это приводит к резкому падению плотности и давления внутри газового пузыря (на рис. 5.2 $t = 300$ – 450 мкс). Затем плотность вещества в центре газового пузыря в районе лунки резко возрастет. Резкий рост средней плотности вещества в центре пузыря объясняется тем, что в момент резкого спада давления происходит

вскипание и выброс металла из лунки. Данные рентгеновской съемки показывают, что выброс металла имеет характер дискретных групп частиц

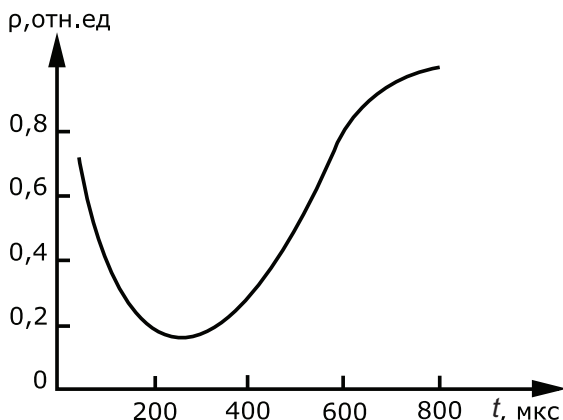


Рис. 5.3. Изменение плотности вещества $\rho(t)$ (в относительных единицах) в центральной части газового пузыря для $W_u = 2,5$ Дж и $\tau_u = 290$ мкс по данным рентгеновской съемки

5.2. Модель механизма электрической эрозии в импульсном разряде

Изложенный анализ электрических тепловых гидродинамических процессов, происходящих при электрической эрозии в жидкой диэлектрической среде, а также экспериментальные данные позволяют сформулировать модель механизма эрозии в условиях размерной электроискровой обработки.

После пробоя искрового промежутка на поверхности электродов под действием бомбардировки электронами (на аноде) и ионами (на катоде) возникают плоские нестационарные источники тепла. Поверхность электрода в зоне действия источника за время примерно $0,01$ – $0,1$ мкс нагревается до тем-

пературы кипения металла, соответствующей данным электродинамическим условиям. Вследствие этого в первой части импульса наблюдается выброс паров металла с электродов. Скорость выброса паров и запас энергии, которую они несут, определяются теплофизическими константами материала и параметрами импульса.

Выброс паров приводит к тому, что между электродами может происходить обмен энергией. Доля энергии, приносимая парами на противоположный электрод, зависит от отношения скорости пара и скорости звука в нем, а также от плотности и температуры пара.

Под действием этих факторов металл на поверхности электрода плавится и частично испаряется, в результате чего на поверхности электрода к концу импульса образуется лунка, заполненная расплавленным и перегретым металлом. Распространение паров за пределы канала разряда, а также процесс расширения канала приводят к образованию газового пузыря.

По мере развития импульса тока скорость испарения растет, вследствие чего давление в газовом пузыре увеличивается. После перехода тока через максимум падает скорость испарения, а с ней и давление. К снижению давления приводит также конденсация паров на стенках газового пузыря, которая становится заметной вследствие снижения скорости испарения и движения жидкости по инерции. Вследствие этого с электродов наблюдается дополнительный выброс небольшой порции паров с поверхности лунки, заполненной расплавленным металлом.

Продолжающееся после окончания импульса расширение газового пузыря и конденсация остатков паров вызывает еще более резкое (ниже атмосферного) падение давления. Это приводит к тому, что из расплавленного перегретого металла выделяются растворенные в нем газы и закипает сам металл. При этом происходит выброс металла из лунки в виде мелких капель и некоторого количества паров. Данные скоростной съемки показывают, что в виде паров при длительностях и запасах

энергии, характерных для обычных условий электроискровой обработки, выбрасывается не более 15–40 % объема выброса.

В зависимости от длительности импульса (при $W_u = \text{const}$) доля выброса в парообразной фазе во время прохождения импульса тока изменяется. С уменьшением длительности эта доля растет и при $t_u = (0,1-1,0)$ мкс и $W_u = (0,1-1,0)$ Дж выброс в парообразной форме может достигать 60–80 % от общей величины эрозии за импульс.

Как следует из физического смысла излагаемой модели механизма, время запаздывания выброса металла $t_{\text{зап}}$ в жидкой фазе, т. е. время завершения процесса эрозии определяется газовой гидродинамическими процессами. Следовательно, нарушение естественного хода термодинамического процесса какими-либо внешними причинами приведет к уменьшению эрозии или стабильности процесса, т. е. действия двух импульсов не будут независимыми. Иными словами, выполнение требования $t_n \geq t_{\text{зап}}$, где t_n — время паузы между импульсами, есть одно из условий возможности осуществления размерной обработки.

Следует оговориться, что это условие является необходимым и достаточным только для случая, если расстояние между точками возникновения двух последующих друг за другом разрядов имеет величину, сравнимую с максимальной величиной радиуса газового пузыря.

5.3. Характеристики электроэрозионного способа обработки материалов

Производительность обработки, чистота поверхности и точность выполнения технологических процессов определяются многими факторами. Важнейшими из них являются параметры электрической схемы, определяющие режим работы, среда, окружающая электроды, а также взаимное расположение, форма и размеры электродов.

Зависимость количества металла, которое удаляется в стальном электроде (аноде), форма образовавшейся от энергии разряда и его длительности лунки приведены в табл. 5.2.

Величина K_1 зависит от формы электродов, расстояния между ними и параметров импульса. Значения K_1 в условиях электроискровой обработки изменяются в пределах 4–40. Объем лунки

$$V = K_2 \pi d_2^2 h, \quad (5.2)$$

где d_2 — диаметр лунки, h — глубина лунки, V — объем удаленного металла, K_2 — коэффициент.

Таблица 5.2

Зависимость глубины лунки h , диаметра лунки d и количества удаляемого металла V от энергии разряда и его длительности

W_u , Дж	t_u , мкс	h , мм	d , мм	$K_1 = d/h$	V , мм ³
0,001	3	0,015	0,1	6,67	0,0000788
0,004	5	0,018	0,15	8,34	0,000218
0,008	12	0,020	0,22	11,0	0,00057
0,03	20	0,022	0,45	20,45	0,002325
0,2	110	0,028	0,95	33,80	0,01322
0,4	200	0,033	1,20	36,40	0,0249
0,6	300	0,037	1,40	37,80	0,0379
0,8	450	0,040	1,55	38,70	0,0505
1,0	600	0,042	1,65	39,30	0,0598
2,0	1500	0,050	2,0	40,00	0,1046

Величина K_2 зависит от параметров импульса и изменяется в пределах 0,11–0,15. K_1 и K_2 от полярности обработки практически не зависят.

Отношение диаметра лунки к ее глубине, как следует из табл. 5.2, увеличивается с ростом длительности разряда. Изменяя энергию и скважность разряда, можно изменять геометрию образовавшейся лунки. Наибольший эффект эрозии имеет место при определенном соотношении энергии и длительности разряда.

При изменении расстояния между электродами происходит изменение соотношения между энергией, рассеиваемой на электродах, и в разрядном канале. Исследования, выполненные А. С. Зингерманом, показали, что при расстоянии между электродами $l_n = 5$ мкм около 1 % энергии выделяется в канале разряда, а 99 % на электродах. С ростом длины разрядного промежутка доля энергии, выделявшейся на электродах, падает. Так, при $l_n = 25$ мкм она составляет 95 %; при $l_n = 50$ мкм — 93 %; при $l_n = 100$ мкм — 89 %. Увеличение l_n до 500 мкм приводит к тому, что 75 % энергии выделяется в канале разряда и только 25 % рассеивается на электродах. Увеличение расстояния между электродами приводит к увеличению диаметра лунки на электродах. Полученная эмпирическая зависимость имеет вид

$$d = \alpha + \beta \lg l_n, \quad (5.3)$$

где l_n — расстояние между электродами, мкм; α — коэффициент. Для стальных, медных, алюминиевых и латунных электродов $\beta = 0,143$ – $0,186$.

Использование униполярных импульсов позволяет осуществлять процесс избирательной эрозии. Если электроды выполнены из одного материала, то при импульсах малой и средней длительности преобладает эрозия анода, при импульсах большой длительности — эрозия катода.

Обрабатываемое изделие присоединяется к тому полюсу, на котором эрозия преобладает.

Из-за эрозии электрода-инструмента происходит его износ, который выражается в процентах к эрозии электрода-изделия

$$\Delta V = \frac{V_k}{V_a} \cdot 100 \%, \quad (5.4)$$

где V_k — интенсивность эрозии катода, V_a — интенсивность эрозии анода.

Полярность электрической эрозии считается положительной при $\Delta V_k < 100 \%$.

Каждый электрический импульс способен выбросить из анода определенную порцию металла, величина которой зависит от энергии и длительности импульса материала электродов и типа межэлектродной среды. В табл. 5.3 приведено требуемое количество импульсов для выброса 1 см^3 вещества импульсами с $W_u = 2,31 \text{ Дж}$, $t_u = 10^{-4} \text{ с}$.

Таблица 5.3

Количество импульсов, требуемое для выброса.
Электрод-инструмент изготовлен из латуни ЛС-59,
среда — керосин

Материал	Количество импульсов	Материал	Количество импульсов
Олово	8064	Медь	52500
Висмут	8316	Медно-графитовая композиция МГ-2	52800
Свинец	8484	Никель	53210
Кадмий	8736	Сталь Х12М	71190
Алюминий	9240	Железо	102270
Цинк	9786	Молибден	125580
Латунь ЛС-59	41580	Графит	191520

Различное влияние импульсных разрядов на металлы и сплавы определяется их теплофизическими свойствами (температура плавления и кипения, теплопроводность и теплоемкость). Механические свойства (твердость и вязкость) на эффект эрозии влияния не оказывают.

Если электроэрозионную обрабатываемость стали условно принять за единицу, то обрабатываемость других материалов соответствует данным, приведенным в табл. 5.4.

Величина электрической эрозии зависит от теплофизических свойств обрабатываемого материала. Результаты опытов не дают возможности установить физические закономерности процесса от влияния какого-либо одного теплофизического ко-

эффективности. Предполагают, что эрозионная стойкость зависит от комплекса теплофизических констант:

$$D = C\rho\lambda T_{\text{пл}}^2, \quad (5.5)$$

где C — теплоемкость, ρ — плотность, λ — теплопроводность, $T_{\text{пл}}$ — температура плавления.

Каждый единичный импульс вызывает эрозию металла, которая по своей величине пропорциональна энергии импульса. Лунки, образующиеся при мощных импульсах, имеют большой объем. По мере снижения энергии импульса объем лунок уменьшается. Обрабатываемая электроэрозионным способом поверхность характеризуется лунками, наложенными друг на друга и не имеющими вследствие этого определенного контура.

Таблица 5.4

Электроэрозионная обрабатываемость различных материалов относительно обрабатываемости стали

Материал	Обрабатываемость	Материал	Обрабатываемость
Магний	6,0	Никель	0,8
Алюминий	4,0	Титан	0,6
Латунь	1,6	Молибден	0,5
Медь	1,1	Твердый сплав	0,5
Сталь	1,0	Вольфрам	0,3

Глубина лунки h практически мало зависит от энергии импульса. Диаметр образующейся лунки изменяется же в широких пределах. Энергия импульсов, их продолжительность и напряжение на электродах, при котором происходит пробой, характеризуют режим обработки.

Режимы обработки могут быть классифицированы на обдирочные или черновые, чистовые или мягкие и отделочные (табл. 5.5).

Таблица 5.5

Характеристики различных режимов обработки материалов

Режим обработки	P источника, Вт	t_u , мкс	f , имп/с	Интенсивность съёмки, мм ³ /мин	Высота неровностей, мкм
Черновой	30000–3000	10000–100	50–3000	30000–300	1000–50
Чистовой	10000–300	500–20	1000–10000	300–30	25–6
Отделочный	1000–5	20–1	1000–300000	30–1	3–1

При уменьшении энергии, применяемой для обработки импульсов, до сотых и тысячных долей Дж могут быть получены поверхности с чистотой до 10 и 11 классов, которые при механической обработке создаются чистым и тонким шлифованием.

Наиболее высокая точность достигается на отделочных режимах, которые характеризуются наибольшими межэлектродными промежутками и в меньшей степени засоряются продуктами эрозии. Засорение межэлектродного промежутка взвешенными в жидкости металлическими частицами приводит к развитию непрямолинейных разрядов, что снижает точность обработки.

Точность обработки и чистота поверхности повышаются с ростом эрозионной стойкости материала, так как при этом единичный разряд снимает меньшую порцию обрабатываемого металла.

5.4. Электротехнологические характеристики обработки

Электротехнологические характеристики электроэрозионных способов обработки позволяют определить по заданным площади, конфигурации и материалу обрабатываемой детали какие электрические режимы и в какой последовательности их

необходимо применить для того, чтобы получить деталь с заданными размерами и чистотой поверхности.

При заданных материалах детали и инструмента, в виде рабочей жидкости и полярности импульса электрического тока, скорость съема металла зависит от площади обработки, конфигурации обрабатываемой детали, параметров электрических импульсов (амплитуды, длительности, скважности и частоты импульсов). Кроме того, скорость съема связана с чистотой обработки обратной зависимостью, согласно которой увеличение производительности влечет за собой снижение чистоты поверхности. Поэтому для получения наилучшей чистоты при наибольшей производительности обработку целесообразно производить ступенчато, путем последовательной смены жестких (черновых), средних (чистовых) и мягких (отделочных) режимов.

На предварительных (жестких) режимах скорость практически не связана с чистотой обрабатываемой поверхности. Поэтому режим обработки назначается, исходя из наличной мощности станка и условий нагрева обрабатываемой детали. Чистовые режимы определяются заданной чистотой поверхности с учетом возможностей данного способа обработки.

Рассмотрим факторы, определяющие скорость съема при различных режимах. Количественные данные относятся к мощному независимому генератору импульсов при обработке стали в веретенном масле медным электродом-инструментом.

На рис. 5.4 представлена зависимость скорости съема от величины среднего разрядного тока для разных площадей обработки.

При постоянной площади обработки увеличение тока приводит вначале почти к пропорциональному возрастанию скорости съема вследствие увеличения объемов расплавленного металла, обусловленных ростом энергии импульсов. Дальнейшее увеличение тока приводит к замедлению роста скорости съема металла и даже к его снижению.

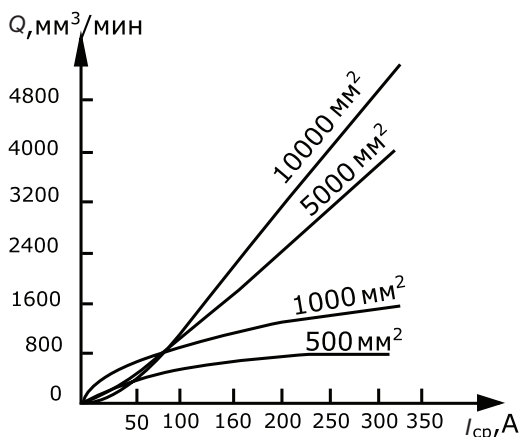


Рис. 5.4. Зависимость скорости съема от величины среднего разрядного тока для разных площадей обработки

Такой ход зависимости «ток — скорость съема» объясняется тем, что при определенной плотности тока в рабочем промежутке появляются участки, на которых жидкость вытесняется газами, процесс обработки осуществляется в газовой среде. Это, как известно, резко снижает скорость съема и приводит к потере устойчивости: наблюдаются частые пропуски импульсов или, наоборот, короткие замыкания. Кроме того что станок теряет регулируемость, отсутствие жидкости приводит к оплавлению обнаженных участков, лунки сливаются и их поверхность покрывается материалом электрода-инструмента. В свою очередь поверхность, покрытая материалом электрода-инструмента, в последующем процессе обработки, даже при наличии в данный момент на участке жидкой среды, будет представлять для инструмента несоответствующую пару. Такого рода обстоятельства приводят к нарушению устойчивости процесса обработки и снижению скорости съема. При оптимальном для данной площади обработки токе имеет место полное использование импульсов тока.

На рис. 5.5 приведена зависимость «скорость съема — площади обработки» при неизменном токе.

С увеличением площади скорость съема возрастает, так как на малых площадях проявляется эффект вытеснения газами жидкости, исчезающий затем при снижении плотности тока, т. е. при увеличении площади обработки.

При некоторой величине площади обработки скорость съема становится максимальной. Это соответствует полному использованию импульсов. Величину тока, при которой наступает максимум, называют оптимальной для данной площади.

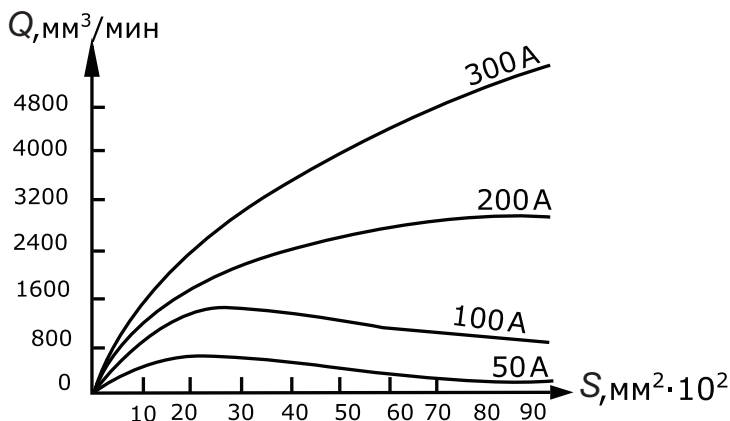


Рис. 5.5. Зависимость скорости съема от площади обработки при постоянном токе

Одновременно с увеличением площади растет сопротивление на пути эвакуации частиц и газов. Так как энергия импульсов неизменна, то неизменными будут давление и импульс силы, прикладываемой к эвакуируемой частице металла. Следовательно, при некоторой величине площади наступает момент, когда часть продуктов не сможет быть удалена из зоны обработки и производительность процесса будет снижаться. Заметное

снижение наступает при малых токах и больших площадях, т. е. на чистовых режимах.

Увеличение скорости съема металла связано с ростом реализуемой в рабочей зоне мощности $P_{\text{ср}}$, которая в условиях электроимпульсной обработки может быть выражена зависимостью

$$P_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T UI_{\text{ср}} dt, \quad (5.6)$$

где $I_{\text{ср}}$ — среднее значение импульсного тока с периодом T .

Увеличение вводимой в рабочую зону мощности возможно двумя путями:

1) за счет увеличения энергии W_u в импульсе в результате повышения его средней мощности, что достигается увеличением среднего тока в импульсе;

2) за счет повышения непрерывности процесса, т. е. в результате уменьшения пауз между импульсами: повышения частоты следования импульсов (рис. 5.6).

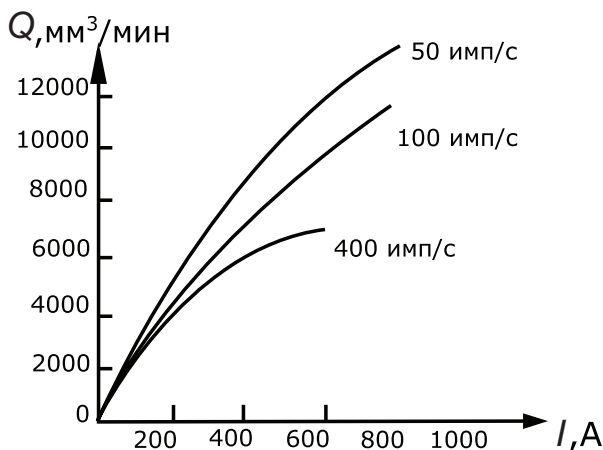


Рис. 5.6. Зависимость скорости съема от тока при различных значениях частоты следования импульсов

Повышение силы тока ведет к снижению устойчивости процесса и потере стабильности процесса. Все это приводит к замедлению роста скорости съема. Замедление роста $\gamma = f(I)$ и снижение устойчивости объясняются ухудшением условий эвакуации продуктов эрозии в особенности из-за образования крупных частиц с размерами, соответствующими величине зазора или превышающими ее, поскольку число крупных частиц растет с ростом силы тока.

Следует отметить, что энергоемкость процесса электрической эрозии снижается при подводе энергии более крупными порциями.

Сопrotивление на пути эвакуации продуктов эрозии определяется не только величиной обрабатываемой площади, но и ее конфигурацией и может быть представлено двумя составляющими: горизонтальной и вертикальной.

Горизонтальная составляющая, или «радиус эвакуации» ρ_z , зависит от формы обрабатываемой поверхности, имеющей площадь F , и может быть определена выражением

$$\rho_z = \frac{1}{F} \int_0^F x_{\min} dF, \quad (5.7)$$

где x_{\min} — минимальное расстояние полета частиц в горизонтальном направлении, dF — элементарная площадка.

Для круга радиусом R радиус эвакуации равен

$$\rho_{z \text{ круг}} = \frac{R}{3}. \quad (5.8)$$

Для прямоугольника со сторонами a и b ($a > b$)

$$\rho_{z \text{ прям}} = \frac{b}{4}. \quad (5.9)$$

Вертикальная составляющая может быть принята равной глубине обработки h или расстоянию от торца инструмента до свободной поверхности.

Таким образом, скорость съема зависит еще от двух геометрических параметров ρ_3 и h , определяющих сопротивление эвакуируемым продуктам эрозии. Следовательно, все данные по скорости съема, относящиеся к определенной величине площади, должны быть приведены к соответствующим значениям ρ_3 и h .

Глубина прошивания h , определяющая вертикальную составляющую сопротивления на пути эвакуации, оказывает, если не приняты специальные меры для уменьшения сопротивления, более сильное влияние на скорость съема металла, чем радиус эвакуации (рис. 5.7). Если принять меры по облегчению условий эвакуации, то можно добиться прямой независимости времени прошивания от глубины (см. рис. 5.8).

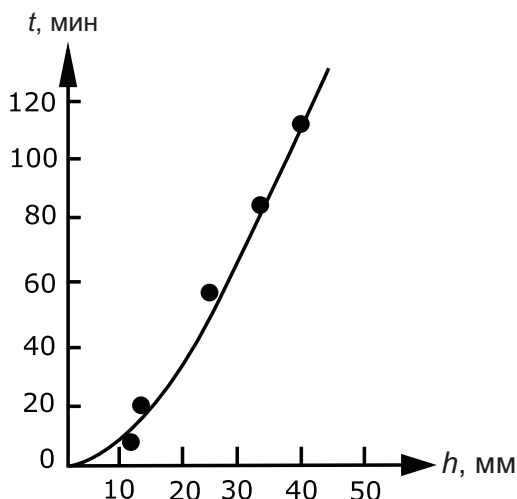


Рис. 5.7. Зависимость времени съема от глубины прошивания в случае, если меры для уменьшения сопротивления не приняты

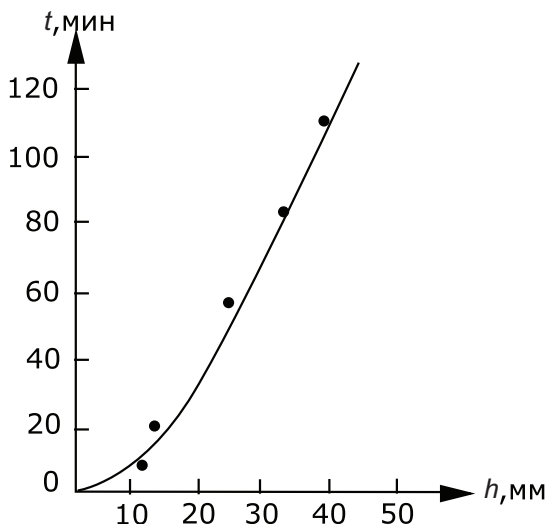


Рис. 5.8. Зависимость времени съема от глубины прошивания в случае, если приняты меры для уменьшения сопротивления

5.5. Выбор материала электрода-инструмента

Одним из главных технологических показателей электроэрозионной обработки является износ инструмента, который определяет во многих случаях точность обработки, расход материала и экономическую целесообразность операции. Многие операции затруднительно или вообще невозможно осуществить при помощи электроэрозионной обработки при наличии большого износа. Например, получение точного отображения фигуры штампа при большом износе инструмента становится затруднительным, так как требуется пяти-шестикратная смена инструментов для получения заданной точности. Изготов-

ление тонких и глубоких щелей практически неосуществимо из-за большого износа инструмента.

Из рис. 5.9 следует, что относительный износ инструмента увеличивается с ростом вводимой мощности и уменьшением площади обработки. На жестких режимах и малых площадях износ достигает 20–22 %. Износ растет особенно сильно, если (как это имеет место в случае обработки площади $\sim 2500 \text{ мм}^2$) режим превышает оптимальный для данной площади. Рост износа с уменьшением площади обработки объясняется ухудшением отвода тепла у электродов с малой площадью. На средних режимах износ снижается до 2–12 % также в зависимости от площади обработки. На мягких режимах его величина может составлять доли процента.

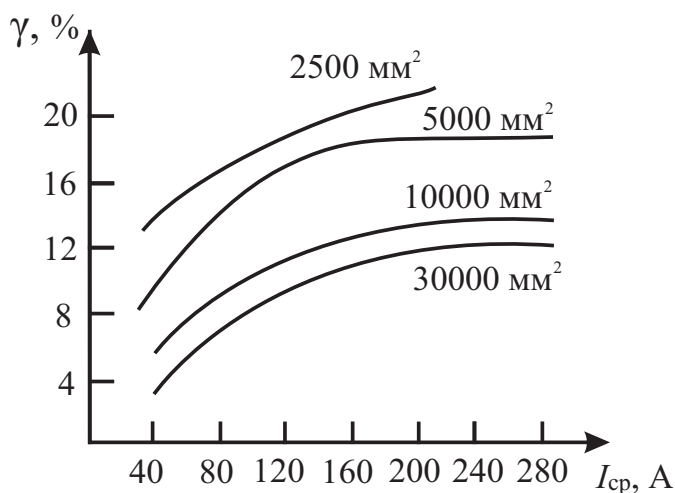


Рис. 5.9. Зависимость относительного объемного износа инструмента от величины среднего тока

Условия для осуществления электроимпульсной обработки отличаются от таковых для электроискровой. Электроискровая

обработка требует для получения относительно меньшего износа прямой полярности: инструмент-катод, деталь-анод. Катод изнашивается при этом в меньшей степени, чем анод.

При электроимпульсной обработке применяют импульсы тока униполярные и более продолжительные, чем в электроискровой. Это обуславливает необходимость изменения полярности при обработке сталей всех марок: инструмент-анод, деталь-катод (обратная полярность).

Следует иметь в виду, что полярность при электроимпульсной обработке может изменяться в зависимости от материала обрабатываемой детали и вида рабочей жидкости. Так, твердые сплавы лучше обрабатывать на прямой полярности. Цветные металлы безразличны к полярности. Если заменить обычно применяемые жидкости — минеральные масла (керосин, веретенное масло, трансформаторное масло и др.) на воду, то обработку сталей следует вести на прямой полярности.

В качестве материала для электрода—инструмента лучше всего применять медь, медно-графитовую композицию, алюминий, чугун. Обычно применяемая в электроискровой обработке латунь марки ЛС-59 непригодна для электроимпульсной обработки. Из рекомендуемых материалов медь и алюминий имеют примерно равные показатели по производительности и объемному износу. Медь целесообразнее применять для тонких и точных работ. Алюминий, ввиду его легкой обрабатываемости (в частности, при изготовлении литых или прессованных электродов), рекомендуется применять при изготовлении штампов. Чугун целесообразен для более грубых работ в диапазоне средних и жестких режимов.

При определенных условиях (прямая полярность, обработка в воде) в качестве материала для инструмента может быть использована обычная сталь.

В течение ряда лет проводятся работы по созданию высокостойких электродных материалов для электроэрозионной обработки на основе углеграфитовых композиций. Внимание к себе

эти материалы заслужили благодаря высокой термостойкости, хорошей обрабатываемости и небольшой стоимости. Величина износа углеграфитовых электродов весьма незначительна. Так, например, некоторые марки углеграфитовых материалов позволяют вести обработку в широком диапазоне режимов с износом, не превышающим 0,5 %. Это дает возможность с помощью одного электрода производить обработку нескольких изделий.

При грубых обдирочных операциях применяются серийно выпускаемые электроды марки В, которые имеют наиболее однородную структуру и изготавливаются с различным числом пропиток (В-1, В-2, В-3). Наиболее дешевым электродом является В-1, имеющий одну пропитку.

При использовании углеграфитовых электродов плотность тока при обработке площадей свыше 1000 мм^2 не должна превышать $1\text{--}3 \text{ А/см}^2$; при обработке площадей менее 200 мм^2 допустимы большие плотности тока — до 10 А/см^2 .

При конструировании инструмента следует учитывать физико-механические свойства материала. Углеграфитовые электроды имеют повышенную прочность при работе на сжатие и низкое сопротивление изгибу и ударным нагрузкам. Поэтому формы и размеры элементов электрода должны обеспечивать прочность конструкции, особенно в местах крепления инструмента.

Применение углеграфитовых композиций для изготовления электродов-инструментов позволяет получить большую экономию в цветных металлах. Например, 1 кг углеграфитовой композиции заменяет при электроискровой обработке до 100 кг алюминия и до 300 кг меди.

Глава 6. Обработка материалов плазменной струей

Бурное развитие современной техники, и в первую очередь таких отраслей, как авиационная, турбостроение, ракетная, обусловило острую потребность в материалах, работающих в условиях высоких температур, больших динамических нагрузок и имеющих высокую стойкость против окисления. Прогресс этих отраслей лимитируется, в частности, способами обработки особо прочных материалов, прочность которых в настоящее время очень сильно возросла и приблизилась к прочности алмаза. В радиоэлектронной и приборостроительной промышленности широкое применение находят ферриты, специальная керамика, германий, кремний, синтетические рубины и алмазы и другие труднообрабатываемые материалы. Кроме того, в электронной, электровакуумной и радиотехнической промышленности развивается тенденция к применению деталей, размеры которых измеряются долями миллиметра, а точность составляет единицы микрон. Форма этих деталей иногда бывает очень сложна, а материал труднообрабатываемый. Подобные материалы и их сплавы механическими методами обрабатываются очень плохо. Эта причина обусловила появление новых принципиально отличных технологий: к ним относятся электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. Новая отрасль электротехнологии приобретает все большее значение и в ряде областей техники становится незаменимой.

Одной из прогрессивных отраслей электротехнологии в промышленности является обработка материалов с помощью дуговой плазменной струи. В основе плазменной обработки материалов лежит принцип создания локализованного интенсивного нагрева с высокими градиентами температуры в зоне обработки, благодаря чему обрабатываемый материал, в месте нагрева, расплавляется, частично испаряется, частично выносится из обрабатываемой области плазменным потоком. Высокоинтенсивным, локализованным источником теплоты является выделенная из дуги струя газоразрядной плазмы со сформированным сечением и практически устойчивыми управляемыми физико-химическими характеристиками. Дуговая плазменная струя нашла широкое применение при обработке различных материалов: проводников, полупроводников и диэлектриков. С помощью плазменной струи можно производить различную обработку материалов: сварка, резка, стружка, термообработка, плавка, нанесение покрытий, наплавка и ряд других операций.

6.1. Плазма и ее некоторые свойства

Плазма может быть определена как вещество, находящееся в сильно ионизованном состоянии. Степень ионизации порядка 10^9 – 10^{10} заряженных частиц в 1 см^3 . Большая степень ионизации обуславливает высокую температуру газоразрядной плазмы, которая по данным ряда источников может достигать величины $5,5 \cdot 10^4\text{ К}$ и выше. Физически плазма является смесью нормальных молекул, атомов, ионов, электронов и других частиц. Впервые плазма была получена более 150 лет назад в виде дугового разряда, но только в 1923 году Н. Ленгмюр дал свое название этому состоянию вещества. Ионизация вещества происходит за счет потери или захвата одного или нескольких электронов атомом плазмообразующего веще-

ства, что является результатом действия внешних сил. Таки-ми внешними силами могут являться упругие соударения ча-стиц, которые вызываются действием высокой температуры или действием электрического поля. В зависимости от вида возбуждающих внешних сил плазма называется дуговой (тер-мической) или высокочастотной. Одним из видов получения плазмы может служить дуговой разряд между двумя электро-дами, помещенными в плазмообразующий газ. Степень ио-низации газа от температуры может быть определена урав-нением Саха, представляющим закон действующих масс для процесса ионизации:

$$\frac{n_e n_i}{n_0} = f(T), \quad (6.1)$$

где n_e — концентрация электронов, n_i — концентрация ионов, n_0 — концентрация нейтральных атомов, или в развернутом виде:

$$\frac{X}{1-X^2} p = 2,4 \cdot 10^{-4} a^2 T^{5/2} e^{\frac{2U_i}{kT}}, \quad (6.2)$$

где X — степень ионизации; p — действующее давление, мм рт. ст.; T — температура газа, К; U_i — потенциал ионизации, В; e — 2,71828; k — $1,37 \cdot 10^{-6}$ эрг·град⁻¹; a — const, множитель, который зависит от положения газа в периодической системе элементов.

Высокая степень ионизации газа обуславливает высокую температуру образующейся плазмы и ее специфические свой-ства. Свойства плазменного состояния вещества напоминают свойства газа, жидкости, электролита и металла. Плазменное состояние вещества характеризуется большей динамической вязкостью, чем вязкость, получаемая из кинетической теории газов. Очевидно, здесь важную роль играют дальнедействую-щие кулоновские силы. Значительно повышается теплопровод-

ность плазмы, что связано с эффектом диссоциации и ионизации. С электрической точки зрения плазма характеризуется повышенной электропроводностью. Это свойство обусловлено наличием в плазме смеси положительных ионов и свободных электронов и этим в некоторой степени плазма напоминает металл.

$$\sigma = \frac{(kT)^{2/3}}{e^2 \sqrt{8m/\pi} \ln \frac{kT}{e^2 n_i U_i}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{nQ}{n_i Q_i}}. \quad (6.3)$$

Так, для температуры $5 \cdot 10^4$ К, пока самой высокой длительной температуры, удельное сопротивление водородной плазмы, примерно, в 1000 раз больше сопротивления никеля. Плазма поддается действию магнитных полей, характер их действия зависит от направления магнитного поля (поперечное магнитное поле, создаваемое самим плазменным потоком, пережимает шнур, изгибает и перекручивает его; наложенное внешнее, продольное поле сжимает шнур равномерно по всей длине и стабилизирует его — это явление известно под названием магнитного «пинч-эффекта»).

6.2. Получение дуговой плазмы

Устройства для получения дуговой плазмы называются плазмотронами, плазменными генераторами, плазменными горелками и головками и плазменными пистолетами. По типу получаемой плазмы для обработки материалов и нанесения покрытий устройства подразделяются на два основных вида. К первому виду относятся устройства для получения плазменной струи, выделенной из столба дуги и не совпадающей со столбом дуги (см. рис. 6.1). Ко второму типу относятся устройства для получения дуговой плазмы, совпадающей со столбом дуги (см. рис. 6.2).

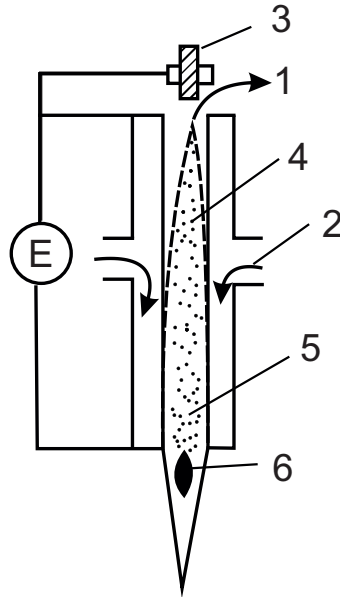


Рис. 6.1. Схематичное изображение устройства для получения плазменной струи, выделенной из столба дуги и не совпадающей со столбом дуги:

1 — плазмообразующий газ, 2 — охлаждающая вода, 3 — электрод, 4 — канал горелки, 5 — столб дуги, 6 — плазменная струя, Е — источник тока

Температура плазменной струи, выделенной из токоведущего столба дуги, при использовании аргона достигает величины порядка $\sim 10^4$ – $1,5 \cdot 10^4$ К и выше и обусловлена в основном высокой плотностью энергии в столбе разряда в результате его обжатия газовым потоком в канале плазменной головки. При водяной стабилизации температура дуги и струи может достигать величины $5 \cdot 10^4$ К. Однако эффективный КПД нагрева плазменной струей, выделенной из столба дуги, не очень велик.

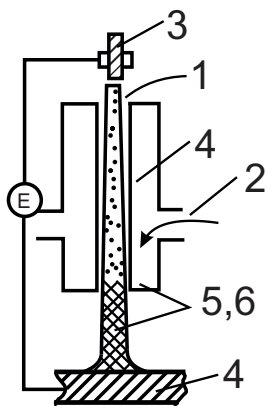


Рис. 6.2. Схематичное изображение устройства для получения дуговой плазмы, совпадающей со столбом дуги:

1 — плазмообразующий газ, 2 — охлаждающая вода, 3 — электрод,
4 — канал горелки, 5, 6 — столб дуги и плазменная струя,
Е — источник тока, И — изделие

При обработке, особенно электропроводных материалов больших толщин, более эффективным является нагрев дуговой плазмой в комбинации с дугой прямого действия. В этом случае изделие подключается к источнику питания для увеличения эффективной тепловой мощности, вводимой в изделие (рис. 6.2). Распределение температуры по сечению плазменной струи и дуговой плазмы приведено на рис. 6.3–6.4.

Градиент потенциала в канале плазменной головки в 2–3 раза превышает градиент потенциала в столбе свободно горящей дуги. Основной характеристикой плазменной струи и дуговой плазмы, как источника теплоты, является ее эффективная тепловая мощность, вводимая в изделие,

$$q = 0,24\eta_k UI, \quad (6.4)$$

где η_k — эффективный КПД плазменного нагрева изделия.

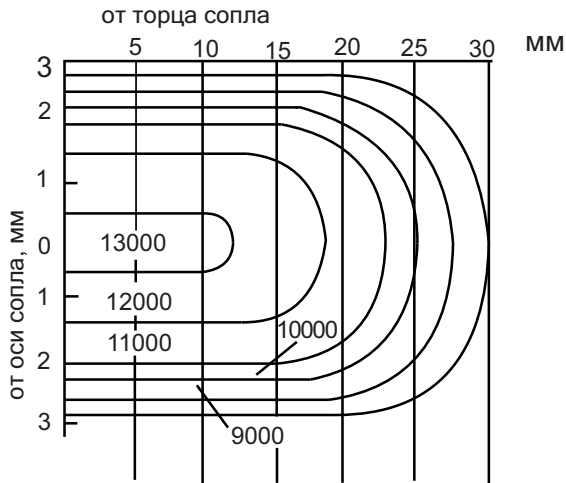


Рис. 6.3. Распределение температуры по сечению в плазменной струе, выделенной из столба дуги

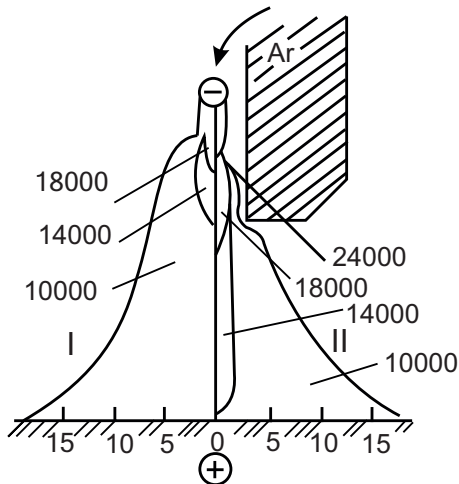


Рис. 6.4. Распределение температуры по сечению:
I — в обычном дуговом разряде, II — в разряде, горящем в канале в среде аргона ($d_k = 1,8$ мм)

При среднем расходе газа КПД эффективного плазменного нагрева для плазменной струи, выделенной из столба дуги, равен 30–50 %, а для плазменной струи, совпадающей со столбом дуги, равен 45–75 % (в литературе представлены зависимости влияния на эффективную мощность q различных факторов: тока, напряжения, расстояния от сопла до изделия и ряд других).

В целях получения высокоинтенсивного локализованного нагрева плазменной струей используется так называемый процесс стабилизации плазмообразования. Стабилизация осуществляется следующими, широко применяемыми в промышленности, способами:

1) Газовая стабилизация — осуществляется с помощью газового потока, подаваемого в канал горелки. Газовая стабилизация бывает двух видов: вихревая и продольная. Вихревая стабилизация осуществляется подачей плазмообразующего газа в камеру перед каналом сопла через тангенциальные отверстия. При этом увеличивается время нахождения частиц газа в канале сопла и соответственно возрастает термический КПД. Кроме того, вихревой поток благоприятно отражается на работе электродов, т. к. перемещает активное пятно дуги по его поверхности. При продольной стабилизации плазмообразующий газ подается в канал у катода, охлаждает его и выходит в отверстие анода, а затем вместе с потоком плазмы в атмосферу.

2) Водяная стабилизация — осуществляется с помощью вихревого потока воды. Этот вид стабилизации применяется тогда, когда вода является одновременно и плазмообразующей средой.

3) Магнитная стабилизация — осуществляется магнитным полем, сжимающим плазменную струю. Это способствует стабилизации до некоторой степени «пинч-эффекта».

6.3. Факторы, влияющие на энергетические характеристики плазменной струи

Плазменную струю можно условно разбить на три характерных участка: первый участок (I) интенсивно охлаждаемый, расположен между катодом и входом в канал. Второй участок (II) сжатого столба находится в сопловом канале и заканчивается зоной вращения анодного пятна (рис. 6.5).

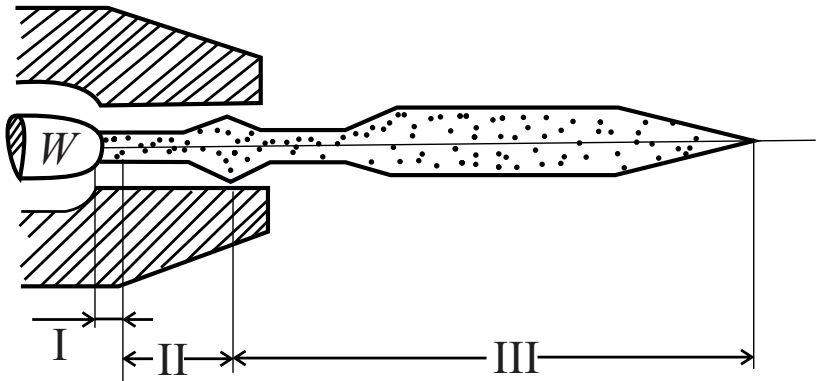


Рис. 6.5. Схематичное изображение плазменной струи

Третий участок (III) открытого столба начинается у анодного пятна и заканчивается ярко светящимся факелом плазмы. На I и II участках происходит плазмообразование. Поток плазмы имеет вид продолговатого сходящегося конуса. Энергия, которую несет плазменный поток, складывается из энергии столба дуги и энергии, получаемой газом, охлаждающим поверхность сопла и катода. Поток плазмы можно охарактеризовать с помощью энергетических показателей — скорости потока, температуры его и теплосодержания

$$C = A \frac{V_0}{d^2} \sqrt{\frac{T}{M}}, \quad (6.5)$$

где C — скорость газового потока, м/с; V_0 — объемный расход газа за единицу времени, м³/с; T — температура газа; d — диаметр сопла, м; A — постоянная величина; M — молекулярный вес газа.

Температура плазмы является не только энергетическим параметром, но и величиной, от которой в большей степени зависят все энергетические показатели. В литературе приведены зависимости T от различных факторов. Одной из величин, характеризующих плазменный поток, является величина проводимости шнура плазмы, $\frac{A}{\text{Ом} \cdot \text{см}}$, которая зависит от напряженности поля

$$g = \frac{I}{E \cdot S}, \quad (6.6)$$

где I — ток дуги, А; E — напряженность поля в канале сопла, В/см; S — сечение шнура разряда, см².

Для устойчивой работы плазменных горелок в течение длительного времени, при постоянной подводимой мощности, необходимо обеспечить на поверхности материала температурные условия, соответствующие свойствам материалов, применяемых в качестве электродов, т. е. сохранить их конфигурацию и расстояние между ними. Зная величину суммарного теплового потока через стенки сопла анода, можно произвести расчет размеров его канала, $\frac{\text{кал}}{\text{с} \cdot \text{см}}$, исходя из необходимости создания благоприятных условий для работы материала сопла

$$ql = \frac{\pi(T_{\omega 1} - T_{f2})}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_1}{d_2} + \frac{1}{\alpha d_2}}, \quad (6.7)$$

где l — высота сопла, см; d_1 — внутренний диаметр сопла, см; d_2 — наружный диаметр сопла, см; λ — коэффициент теплопроводности материала сопла, $\text{кал} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{град}^{-1}$; $T_{\omega 1}$ — температура стенки канала, $^{\circ}\text{C}$; $T_{\omega 2}$ — температура наружной поверхности канала; T_{f2} — температура охлаждающей жидкости; α — коэффициент теплопередачи от стенки цилиндра к охлаждающей жидкости, $\text{кал} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{град}^{-1}$.

При продольном потоке жидкости

$$\alpha_{\text{прод}} = \frac{0,023 \cdot \omega^{0,8}}{d_2^{0,2}} \frac{\lambda_f}{a_f^{0,4} \cdot \nu_f^{0,4}}, \quad (6.8)$$

а при поперечном

$$\alpha_{\text{попер}} = \frac{0,226 \cdot \omega^{0,6}}{d_2^{0,4}} \frac{\lambda_f}{a_f^{0,4} \cdot \nu_f^{0,4}}, \quad (6.9)$$

где $\alpha_{\text{прод}}$, $\alpha_{\text{попер}}$ — продольный и поперечный коэффициент теплопередачи, $\text{кал} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{град}^{-1}$; ω — скорость течения жидкости, см/с; d_2 — диаметр соплового цилиндра, см; λ_f — коэффициент теплопроводности жидкости при расчетной температуре, $\text{кал} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{град}^{-1}$; α_f — коэффициент кинематической вязкости, $\text{см}^2/\text{с}$; ν_f — коэффициент температуропроводности жидкости, $\text{см}^2/\text{с}$.

В случае, когда электроды находятся в особенно сложных условиях, необходимо искусственно создать вращение шнура разряда, а вместе с ним анодного и катодного пятен. Вращение дугового разряда осуществляется либо созданием вокруг него вихревого потока газа с $V = \text{const}$, либо созданием поперечного магнитного поля, напряженность которого можно вычислить, зная ток разряда и задавшись скоростью вращения анодного пятна.

$$V = 0,5 \sqrt{\frac{2IH}{\gamma d}}, \quad (6.10)$$

где V — скорость движения активного пятна дуги, см/с; H — напряженность магнитного поля, Э; I — ток разряда, А; γ — плотность плазмообразующего газа, г/см³; d — диаметр шнура дуги. В качестве плазмообразующей среды используется вода, а также газы: азот, водород, гелий, аргон и их смеси. В чистом виде гелий почти не используется из-за большой его стоимости и разрушающего действия, которое он, как и водород, оказывает на электроды. В качестве охлаждающей жидкости могут использоваться жидкости, обладающие высокой теплопроводностью, температуропроводностью и кинематической вязкостью. В большей мере этим условиям отвечает обычная вода.

6.4. Области применения плазменных технологий

Использование плазменной струи и дуговой плазмы позволяет производить разнообразные виды обработки различных материалов (сварка, плавка, пайка, наплавка, резка, строжка, нанесение различных покрытий, термическая обработка и ряд других операций). Большие возможности, которые дает плазменная струя и дуговая плазма при обработке различных материалов, независимо от их химического состава и механической прочности, позволили плазменной обработке найти широкое применение во многих отраслях промышленности. Плазменная обработка применяется в настоящее время в тяжелом машиностроении, в авиационной, судостроительной, ракетной, электровакуумной, радиоэлектронной, радиотехнической промышленности. В некоторых отраслях промышленности плазменная обработка материалов является почти незаменимой. К основным широко распространенным видам обработки материалов плазмой относятся:

- а) резка (плазменной струей и дуговой плазмой),
- б) нанесение покрытий,
- в) токарная обработка тел вращения,

- г) сварка жаропрочных материалов и их сплавов,
- д) наплавка,
- е) сверление отверстий.

Резка материалов

Впервые для целей резки плазма нашла техническое применение в 1955 году. Плазменная резка применяется для разделки алюминия и его сплавов, меди и ее сплавов, нержавеющей и высоколегированных: сталей, чугуна и диэлектрических материалов. С точки зрения характера разрезаемых материалов можно выделить основные варианты:

- 1) механизированная резка листового материала,
- 2) ручная резка листового материала,
- 3) обрезка прибылей литья,
- 4) специальные виды резки (подводная и «летучая»).

Толщина разрезаемых листов колеблется от долей миллиметра до сотен миллиметров (в настоящее время можно резать до 250 мм и разрабатываются установки для разрезания листов толщиной 300 мм). Для резки тонких листов применяются горелки с внутренней (непереносимой) дугой. Для более толстых листов применяются горелки с переносимой дугой на изделие (резка проникающей дугой). При плазменной резке используется тепло непосредственно плазменной струи, а не химический процесс горения в кислороде. Плоскость реза при плазменной обработке слегка наклонна к поверхности детали. При современном состоянии плазменной техники удается получить угол между осью горелки и плоскостью реза менее 5° (при точной обработке малых толщин практически ось горелки и плоскость реза параллельны). Ширина реза равна примерно двойному диаметру сопла. При плазменной резке большинство материалов не требует дополнительной обработки. Зона термического влияния, из-за больших градиентов температуры в зоне реза (см. рис. 6.6) при больших скоростях, небольшая. Так, резка аустенитных материалов с высокой скоростью

резки ($V = 1,3$ м/мин) не приводит к какому-либо изменению структуры металла на поверхности реза. При резке алюминиевых сплавов зона термического влияния при толщине листа 80 мм составляет величину более 4,0–4,5 мм. В алюминиевых сплавах (склонных к тепловому старению) при плазменной резке возникают в зоне реза трещины, глубина которых колеблется от 0,25 до 2,5 мм, а ширина — от 0,0254 до 0,2 мм. Правильным выбором скорости подачи можно избежать возникновения трещин. Максимальная скорость плазменной резки достигает 7,5 м/мин (450 м/ч), при таких скоростях ширина зоны термического влияния оказывается очень малой. Применение двухстороннего подвода дуги позволяет увеличить мощность горелки и применять резку дуговой плазмой при непрерывной разливке слабов. Расчет режимов резки можно производить методом относительных скоростей. Суть этого метода заключается в том, что, зная режим резки одного материала, можно определить скорость резки любого другого материала.

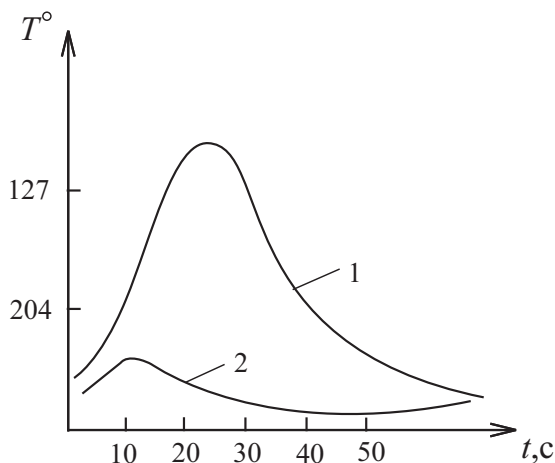


Рис. 6.6. Градиент температуры в зоне реза:

1 — сталь; 2 — алюминий

$$(C_э T_{плэ} + q_э) \rho_э V_э + \lambda_э T_{плэ} = (C_i T_{плі} + q_i) \rho_i V_i + \lambda_i T_{плі}, \quad (6.11)$$

где индекс «э» относится к материалу, скорости резания которого определены опытным путем, а индекс «і» к рассчитываемому материалу, V — скорость резки, C — средняя величина удельной теплоемкости, $T_{пл}$ — температура плавления, q — скрытая теплота плавления, ρ — плотность, λ — коэффициент теплопроводности. Граничные параметры режимов резки: ток дуги меняется в пределах 350–450 А (алюминий — 350 А, медь — 450 А). Напряжение дуги практически не зависит от природы материала, а только от толщины разрезаемых листов

$$U_g = \frac{A}{\sqrt{d}} + B \cdot \lg d, \quad (6.12)$$

где U_g — напряжение дуги, d — толщина листа, A и B — коэффициенты, зависящие от состава и скорости подачи газа, а также от диаметра отверстия сопла горелки. Расход газа определяется условиями, обеспечивающими нормальную работу головки, и не зависит от природы разрезаемого материала. Средняя скорость подачи газа 3 м³/ч и может увеличиться до 3,5–4 м³/ч при толщине листов 80 мм и выше или уменьшиться до 2–2,5 м³/ч при $d = 10$ мм и меньше. Основным параметром режима резки, зависящим от материала, является скорость, поэтому расчет сводится к определению скорости при данных характеристиках дуги и газовой смеси. Плазменные головки по своему назначению можно разделить на два вида: а) головки для резки, обрезки прибылей, т. е. для разделки материала, б) головки для точной обработки деталей.

Принципиальные схемы плазменных головок первого вида приведены на рис. 6.1. В качестве электродов (катод) чаще всего используется вольфрам или цирконий. В случае резания проникающей дугой источник подсоединяется к изделию (см. рис. 6.2). При резании такими головками неметаллических тел (диэлектрики и полупроводники) на разрезаемое изделие

накладывается тонкая металлическая полоса по контуру реза. Для регулирования режимов резки при постоянном расходе газа и постоянной величине тока используются головки с различным конструктивным исполнением. На рис. 6.7 приведены принципиальные схемы различных конструктивных исполнений плазменных головок.

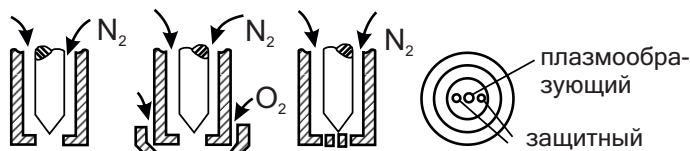


Рис. 6.7. Принципиальные схемы различных конструктивных исполнений плазменных головок

Для улучшения режимов резки проникающей дугой используются головки с независимой подачей газов в анодную и катодную области дуги (рис. 6.8).

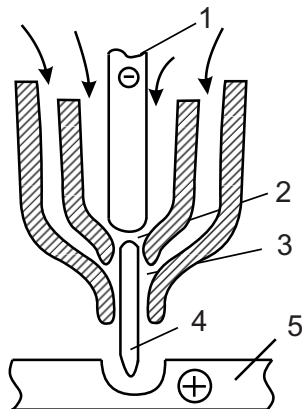


Рис. 6.8. Схема головки с независимой подачей газов в анодную и катодную области дуги:

- 1 — электрод; 2 — катодная область дуги; 3 — канал для подачи газа в участок стабилизации, сжатия дуги и в анодную область;
4 — анодная область, 5 — изделие

В этой конструкции предусмотрены два варианта подачи газов:

- 1) в катодную часть подается аргон, в анодную — водород.
- 2) в катодную часть — аргон, в анодную — воздух.

В первом случае снижается U_g дуги, что важно при ручной резке, и есть возможность использования обычных источников питания. Во втором случае снижается расход аргона (в 10 раз) и благодаря созданию высокоскоростного потока воздуха происходит лучшая стабилизация дуги и исключается двойное дугообразование. Отсутствие водяного охлаждения позволило сделать головки легче, мобильнее и надежнее в работе.

На рис. 6.9 показан плазменный микрорезак с прецизионным соплом, у которого разряд осуществляется в очень малом объеме при высоком давлении газа.

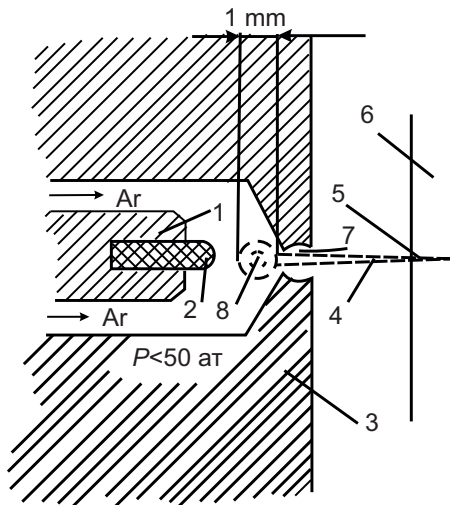


Рис. 6.9. Схема плазменного микрорезака с прецизионным соплом:

- 1 — точно центрированный охлаждаемый водой медный электродержатель;
- 2 — торированный вольфрамовый катод; 3 — медный корпус; 4 — плазменная микроструя (скорость потока в направлении к детали 1000 м/с);
- 5 — прорезь или отверстие; 6 — деталь; 7 — сопло Дюваля;
- 8 — высокотемпературная плотная плазма

Сопло имеет диаметр, в узком месте, от 50 до 100 микрон. Плазма почти цилиндрическая, истекающая из сопла со сверхзвуковой скоростью (331 м/с). Может работать в непрерывном и импульсном режимах. (Этот резак разработан институтом Von Ardenne, Германия). Установки плазменной обработки (резки) включают в себя, кроме плазменных головок, еще блок питания и схему управления. Ниже будут приведены схемы некоторых установок для плазменной резки. На рис. 6.10 приведена схема резака с воздушно-водяной стабилизацией и схема управления установки для резания. Установка применяется при раскрое листов высоколегированных сталей, алюминия и его сплавов, латуни, резки литья и отрезки прибылей. Ручная резка при $U_{xx} = 90-180$ В, $d = 40-50$ мм при больших толщинах, при больших толщинах механизированная резка при U_{xx} более 180 В.

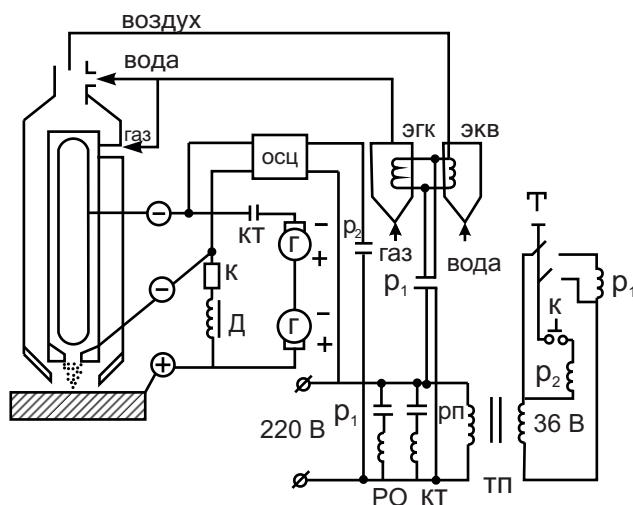


Рис. 6.10. Схема резака с воздушно-водяной стабилизацией и схема управления установкой для резания:

Р — резак, Т — тумблер, Р₁, Р₂, РП — реле и их контакты, КТ — контактор, Г — источник питания, Тр — трансформатор, К — кнопка, R — сопротивление, ОСЦ — осциллятор, Д — дроссель, ЭГК и ЭВВ — клапаны газовый и воздушный

Резка может проводиться и в смеси Ar и N_2 . Вес резака 350–400 г со сменными соплами. В качестве источника питания — два генератора ПСО-500. Схема установки приведена на рис. 6.11. Установка используется при монтажных работах.

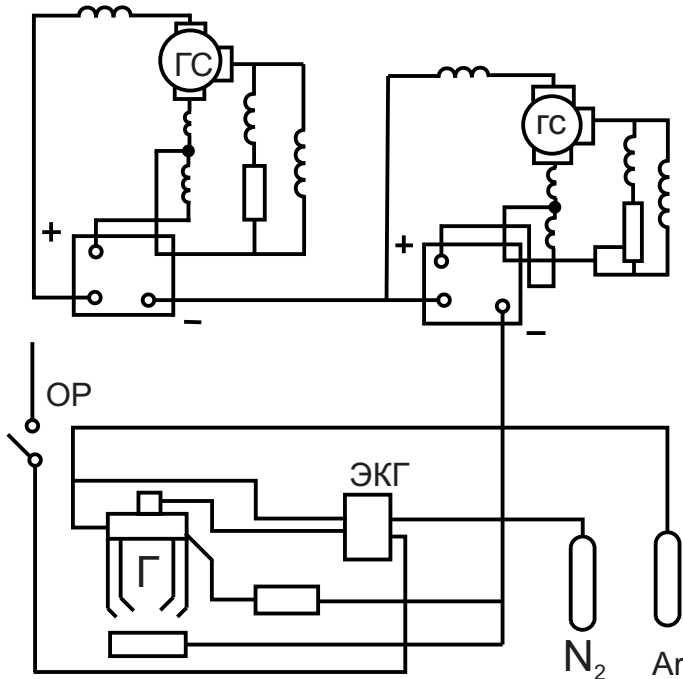


Рис. 6.11. Установка для резки в среде Ar и N_2 :

Г — плазменная головка, ЭКГ — электрогазовый клапан,
 ОР — однополюсный рубильник, ДС — добавочное сопротивление,
 ГС — сварочный генератор

На рис. 6.12 приведена схема поста для плазменной резки в среде азота.

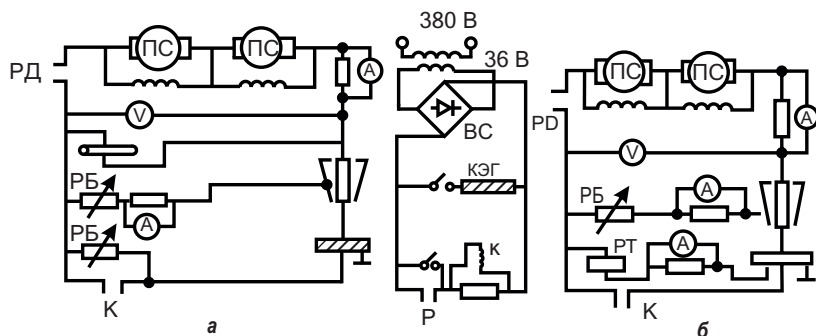


Рис. 6.12. Схема поста для плазменной резки в среде азота:

а — при включении в цепь дополнительного сопротивления и реле напряжения; *б* — при включении в цепь реле тока

Для уменьшения тока, при зажигании возбуждающей дуги между соплом и электродом, в цепь включены балластные сопротивления РБ-300. Возбуждающая дуга зажигается при малых расходах дежурного газа (7–8 л/мин) и малых расстояниях электрод–сопло. Обязательным условием устойчивой работы в среде N_2 является повышение инерционности электрической схемы для обеспечения плавного нарастания тока в момент возбуждения рабочей дуги. Эту задачу решают следующим образом:

а) включением в цепь дополнительного сопротивления (РБ) и реле напряжения (РН),

б) включением в цепь реле тока (РТ), обмотка которого обладает сопротивлением, достаточным для ограничения тока в начальный момент резки величиной около 100 А.

Регулировка расхода и последовательности подачи дежурного и рабочего газа осуществляется блоком регулировки газа, состоящим из ротаметра, вентиля и электромагнитных газовых клапанов. Все оборудование блоков смонтировано в шкафу. В качестве головок используются РГ-7 и РГ-1 (ранее применялись с Ar и Ar, N_2). Замена Ar и Ar, N_2 на азот снизила

стоимость 1 м реза примерно в 6 раз. Процесс резки в N_2 не требует соблюдения каких-либо особых требований техники безопасности.

В качестве источников питания используются сварочные преобразователи с некоторыми изменениями (ПС-300, ПС-500, САМ-400, СУГ-2, ПСО-300, ПСО-500, ПСО-800, ПСГ-350, ПСГ-500): $U_{xx} = 70\text{--}90\text{ В}$, $I = 300\text{--}800\text{ А}$. Кроме этого, используются сварочные выпрямители (ВСС-120 и ВСС-300) с $U_{xx} = 60\text{ В}$, $I = 120\text{--}300\text{ А}$. Сварочные трансформаторы для плазменной резки можно использовать только совместно с выпрямителями (ТС и СТАН — с селеновыми выпрямителями СТЭ, СТН и ТСД — с отдельным индуктивным сопротивлением могут использоваться с селеновыми и игнитронными выпрямителями). Для резки дугой используют электрическую схему источника питания с плавной регулировкой мощности от 5 до 100 кВт дросселями насыщения. На рис. 6.13 приведена схема источника питания. Использовалась головка Т-12 с независимой подачей газа в анодную и катодную области дуги.

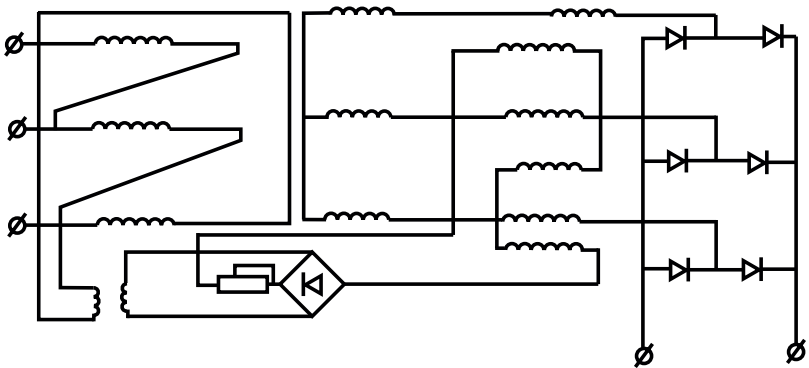


Рис. 6.13. Схема источника питания с плавной регулировкой мощности от 5 до 100 кВт дросселями насыщения

Напыление (нанесение покрытий)

Для надежной защиты материала часто необходимо на его поверхность наносить покрытия из тугоплавких, антикоррозийных и жаростойких материалов. Для получения таких покрытий пользуются различными методами (поток плазмы, кислородно-ацетиленовое пламя, взрывной пистолет, газовая или электрическая сварка, гальванические методы, пульверизация и намазка, диффузионное насыщение, эмалирование и др.). Каждый из этих способов имеет свои особенности. Наиболее универсальным методом нанесения защитных покрытий является метод напыления покрытий с помощью потока плазмы — так называемое плазменное напыление. По своим возможностям он превосходит все вышеперечисленные методы. Преимущества плазменного напыления заключаются в следующем:

1. Позволяет наносить любые материалы независимо от их температуры плавления.
2. Позволяет напылять материалы без их разложения, не допуская окисления поверхности, благодаря отсутствию кислорода в плазмообразующем газе.
3. Позволяет получать сплавы различных материалов и наносить многослойные или пакетные покрытия.
4. Позволяет получить плотность покрытия до 98 % и достигнуть прочного сцепления с основным материалом благодаря высокой скорости потока.
5. Покрываемая поверхность нагревается до температур не более 100–200 °С.
6. Покрытия могут наноситься на металлы, керамику, пластмассы, графит, стекло, дерево, асбестовую ткань, окрашенные поверхности и т. д.
7. Энергетические характеристики потока плазмы можно изменять в зависимости от требований технологии, что неосуществимо при газоплазменном методе. Величина пятна нагрева при напылении, при нормальном законе распределения удельного теплового потока по пятну нагрева, т. е. когда

$q_2(r) = q_{2m} \exp(-kr^2)$, определится из выражения, если считать $q_2(r)$ практически заметным, если он равен 5 %.

$$d_H = \frac{3,46}{\sqrt{\kappa}}, \quad (6.13)$$

где $q_2(r)$ — удельный тепловой поток струи в любой точке напыляемой поверхности, кал $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$; q_{2m} — наибольший удельный тепловой поток на оси струи; r — радиальное расстояние точки от оси струи, см; κ — коэффициент сосредоточенности теплового потока струи, характеризующий форму кривой нормального распределения, см^2 ; d_H — диаметр пятна нагрева. При расстоянии от сопла до изделия больше 100 мм условный диаметр сопла практически совпадает с шириной покрытия, нанесенного за один проход, а если $L < 100$ мм, то d_H больше ширины покрытия. Коэффициент κ можно определить графически из кривой на рис. 6.14.

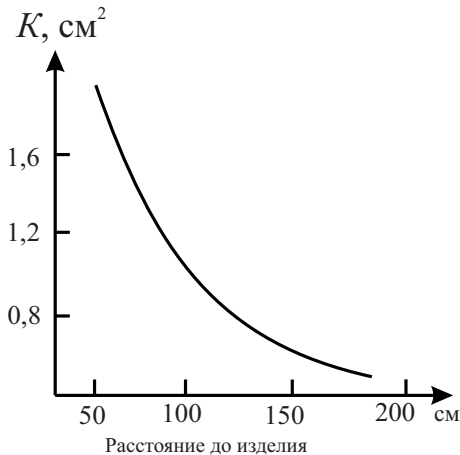


Рис. 6.14. Зависимость коэффициента сосредоточенности теплового потока струи от расстояния до изделия

Стоимость оборудования превышает затраты на установку для газоплазменного напыления. Однако возможности широкого применения установки плазменного напыления и высокое качество плазменного покрытия оправдывают расходы на ее приобретение и эксплуатацию. Конструкции головок для плазменного напыления принципиально не отличаются от головок для резания плазменной струей. Отличие заключается в приспособлении для подачи напыляемого материала в плазменный поток. Напыляемый материал вводится или в плазменный поток или в стабилизирующий газ. Последнее гораздо выгоднее, т. к. позволяет снизить на $2/3$ мощность горелки в сравнении с горелками, где порошок вводится в плазменный поток. Одна из схем включения аппарата для плазменного напыления и схема транспортирующего устройства приведены на рис. 6.15. Перед нанесением покрытий с помощью потока плазмы необходимо предварительно подготавливать поверхность. Существует ряд методов подготовки поверхности перед металлизацией:

1. Механические методы создания шероховатой поверхности (дробеструйная, обдув порошком корунда, нанесение «рваной» резьбы).
2. Электроискровой (с помощью никелевого электрода).
3. Химический (травление).
4. Нанесение методом металлизации промежуточного слоя из молибдена.

Обязательно при всех методах тщательное обезжиривание. Используются порошки (при металлизации) — вольфрам, молибден, никель, кобальт, карбид вольфрама, титан, окись алюминия. Размеры порошка соответственно: 20–40, 5–20, 10–20, 10–30, 20–40, 0–10, 15–40 микрон.

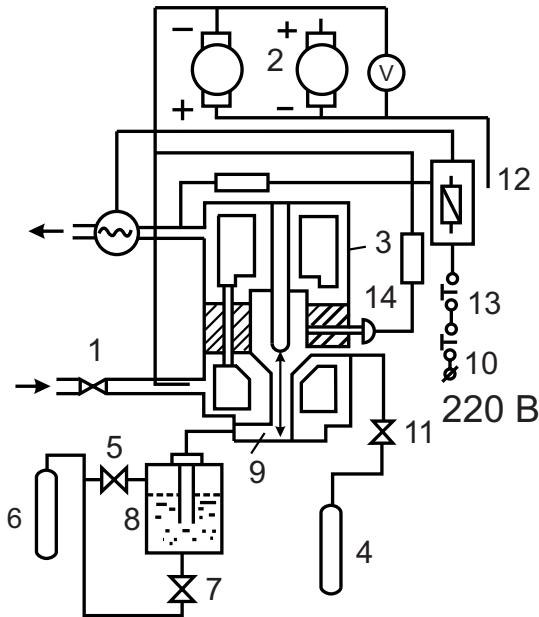


Рис. 6.15. Схема включения аппарата для плазменного напыления и схема транспортирующего устройства:

1 — вентиль водяного охлаждения; 2 — источник тока; 3 — плазменная горелка; 4 — стабилизирующий газ; 5 — редуктор; 6 — транспортирующий газ; 7 — редуктор; 8 — транспортирующее устройство; 9 — длина дугового промежутка; 10 — сетевой выключатель; 11 — вентиль стабилизирующего газа; 12 — контактор; 13 — защитный выключатель; 14 — устройство для возбуждения дуги

Токарная обработка

Одним из видов плазменной обработки является токарная обработка тел вращения. Схема расположения плазменной горелки относительно вращающейся детали показана на рис. 6.16. Ось горелки в большинстве случаев располагается под углом 60° к вертикальной оси. Угол резания составляет 30° .

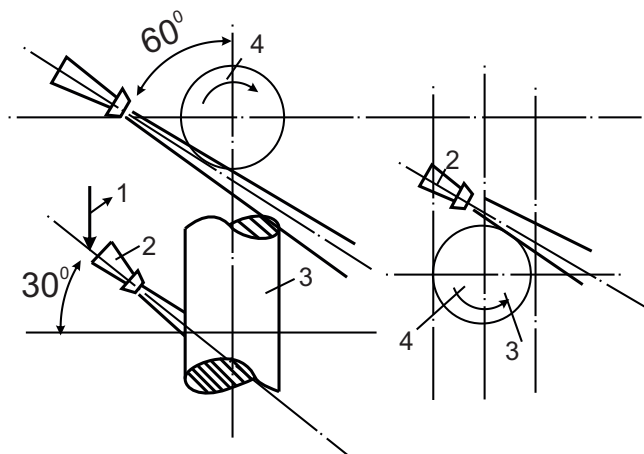


Рис. 6.16. Схема расположения плазменной горелки относительно вращающейся детали:

1 — направление движения горелки; 2 — горелка; 3 — заготовка;
4 — направление движения заготовки

Такое расположение обеспечивает ходовое выдувание расплавленного металла плазменной струей и высокую производительность процесса от 4,5–35 кг/ч при $d = 150$ мм и мощность 50–70 кВт для стали от 45–51 кг/ч с подогревом до 600°C для меди.

Используется для изготовления канавок штековых конвейеров при огневой очистке наружных поверхностей кокилей, удаление окалины, литейной корки, при предварительной обработке деталей.

Наплавка

Плазменная наплавка разработана позже плазменного напыления. Метод плазменной наплавки отличается от плазменного напыления тем, что наряду с продуванием плазмообразующего газа предусматривается газовая защита жидкой ванны

от взаимодействия с воздухом и продувание газоносителя для наплавляемого порошка. При наплавке одновременно используются переносимая и непереносимая дуги. Между вольфрамовым электродом и основным соплом возбуждается замкнутая ВЧ-дуга, питаемая от источника тока 1 (рис. 6.17). Эта дуга служит для подогрева напыляемого материала. Вторая открытая дуга горит между W-электродом и деталью и питается от источника 2.

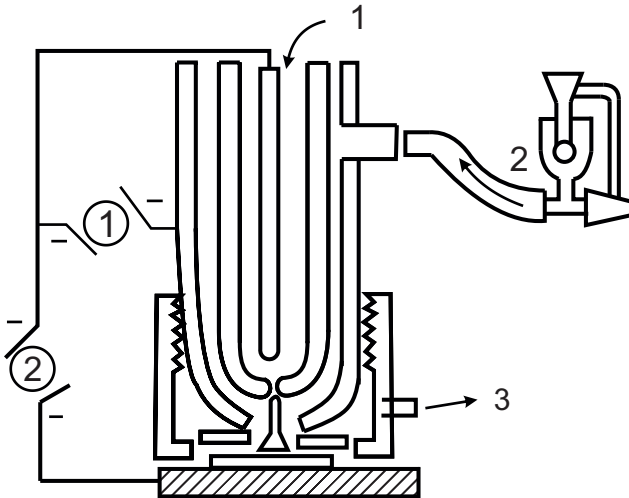


Рис. 6.17. Схема метода плазменной наплавки:

① и ② — источники тока, 1, 2, 3 — потоки газа

Она служит для получения ванны расплавленного материала на поверхности наплавляемой детали. При наплавке используются три потока газа: 1 — плазмообразующий, 2 — для переноса порошка, 3 — для защиты ванны от окисления.

Преимущество плазменной наплавки заключается в следующем:

- а) ограниченная толщина наплавляемого материала;
- б) высокая производительность,

в) незначительное перемешивание основного и наплавляемого материала.

Толщина наплавляемого слоя может регулироваться в пределах 0,25 мм до 5 мм. Плазменная наплавка применяется для хорошего соединения наносимого материала с деталью. Метод наплавки используется для армирования режущего инструмента, вентилях тепловых двигателей, лопаток турбин, штамповочного инструмента и т. д. Производительность от 0,5—4,5 кг/ч.

Сварка

Наряду с вышеперечисленными видами плазменной обработки материалов широко используется и плазменная сварка. Целесообразность применения плазменной сварки диктуется следующими условиями:

- 1) соединить материалы, сварка которых обычными способами затруднена (тугоплавкие);
- 2) повысить производительность процесса сварки хорошо свариваемых материалов;
- 3) получить сварные соединения, образованные преимущественно за счет глубокого проплавления основного металла при небольшой добавке присадочного материала.

Плазменные горелки для сварки аналогичны по конструкции горелкам для плазменной резки. Однако, в отличие от горелки для резки, поступающий в сварочную горелку второй поток газа, который окружает дугу, служит для защиты расплавленной ванны от окисления. Использование горелок с плазменной струей, выделенной из столба дуги, нецелесообразно, т. к. 60—70 % тепловой энергии вводится в сопло и лишь 20—30 % — в свариваемую деталь, вследствие того, что расход газа нельзя делать большим из-за разбрызгивания металла. Сварка нашла применение в металлообрабатывающей промышленности, где применяются труднообрабатываемые материалы, например, в химической, атомном реакторостроении и при производстве космических аппаратов. Особенно широкое применение на-

шла прецизионная размерная сварка с применением микрогорелок, в авиастроении и автомобильной промышленности. Быстрое развитие современной промышленности и отдельных ее элементов ставит новые требования к технике прецизионной сварки. Сварка плазменными микрогорелками дала новые возможности при изготовлении измерительного инструмента и электронных устройств в электромедицинском аппаратостроении.

Получение новых материалов

1. Получение сверхчистых веществ. Используется высокочастотный плазмотрон, разряд которого горит, не касаясь стенок. Он разогревает материалы, и они осаждаются на определенных подложках. То же самое касается нанопорошков. Любой порошок засыпается под сопло, нагревается, испаряется. Пары выдуваются, закаливаются. Также впрыскивается вода и образуется нанопорошок. Однако при данном способе получения существует большой фракционный разброс: от 20 до 500 нм. По этой причине он практически не применяется.

2. Получение тугоплавких соединений (карбиды, барида, нитриды). У всех них температуры плавления за 2000 градусов.

3. Получение полупроводников. Плазмой создается объемный высокочастотный разряд и из него вытаскиваются ионы, которые могут разгоняться и равномерно наносятся тонкими слоями (0,1–0,2 мкм).

4. Получение новых материалов (C_3 , C_9 , AlO). Образуются при нагреве и резком охлаждении.

Плазмохимия

1. Пиролиз углеводородов.
2. Получение ацетилена, сажи, водорода.
3. Получение винилхлорида из любых дешевых углеводородов.

4. Получение цианидов, хлор-, фторуглеродородов.
5. Получение формальдегида.
6. Окисление хлоридов металлов.
7. Восстановление окислов руд.

Эти процессы хороши с точки зрения простоты конструкции и высокой скорости протекания реакции за счет огромных температур. Химическая реакция идет со скоростью явления переноса. Имея трубку 25 мм в диаметре и длиной 300 мм, можно получить 20000 тонн ацетилена в год. В трубе получают плазму, затем впрыскивают порошок (например, уголь). После ионизации образуется поток ионов. На определенном расстоянии впрыскивается пар, закаляя эту плазму. В зависимости от температуры пара получается тот или иной конечный продукт.

Другие преимущества: одностадийность, чистота процесса (без примесей).

Плазменная металлургия

1. Плазменные металлургические печи. Металл плавится под действием плазмы и можно получать различные термические соединения типа ковара, броневых сталей.

2. Печи прямого восстановления железа.

В плазме получается СО — газ-восстановитель, железная руда измалывается в порошок и при нагреве восстанавливается до чистого металла.

Плазменная энергетика

1. МГД-генераторы. В свое время было такое веяние: при сгорании угля температура высокая и желательно было использовать эту энергию. Тогда КПД повышается с 33 до 70 %. Была создана установка 25 МВт мощностью, но из-за проблемы стойкости электродов проект был закрыт.

2. Управляемый термоядерный синтез. Примером может служить установка «ТОКАМАК».

3. Плазменные коммутаторы силовых электросетей. Используются во избежание бросков напряжения при размыкании линий электропередач. Если резко оборвать, то di/dt будет таким, что вызовет колоссальное перенапряжение. Плавность разрыва может обеспечить плазменная дуга.

4. Плазменный розжиг котлогрегатов ТЭЦ, металлургических печей. Проблема состоит в размерах котлов, в связи с чем требуется подавать большой поток газа, способного струей задуть поджигающий фитиль. При подаче размолотого угля существует вероятность попадания земли, что вызывает тушение пламени, и при последующей подаче газовой среды может произойти взрыв. Поэтому используют мазутные горелки, постоянно поддерживающие температуру недожога. С помощью плазмотронов можно разложить порошок угля на ионы и на выходе получить несгораемый факел.

5. Плазменные двигатели внутреннего сгорания (многотопливные дизели). Недостаток дизельных агрегатов — вредность выхлопов, достигающаяся следующим образом: при впрыскивании солярки происходят взрывы капель топлива после смешивания их с парами нагретого газа и достижения температуры вспышки. Нужен процесс управляемого горения, т.е. поставить плазменную свечу, чтобы максимально нагреть объем.

6. Плазменные ракетные двигатели.

7. Плазменные ускорители элементарных частиц.

Экология

1. Плазменная переработка мусора, отходов производства. При обычном сгорании мусора в воздух попадают вредные оксиды, разлагающиеся на ионы в случае использования плазменных горелок. При впрыскивании пара можно получить обычный бытовой газ, который можно сжигать в электростанциях.

2. Обезвреживание ядов, в том числе боевых отравляющих веществ.

Плазменная электронная техника

1. Низковольтные газонаполненные диоды. Наполнение диода плазмой позволяет при небольших напряжениях проводить большие токи.
2. Тиротроны (быстродействующие мощные переключатели).
3. Игнатроны (коммутаторы тока до 100000 А).
4. Стабилитроны, стабилизирующие за счет газового разряда.
5. Газонаполненные фотоэлементы.
6. Счетчики Гейгера.

Плазменные лазеры

1. He-Ne лазеры.
2. CO₂ и СО лазеры.
3. Эксимерные лазеры.
4. Ионные лазеры на инертных газах.
5. Лазеры на парах металлов.
6. Рекомбинационные лазеры.

Плазменные источники света

1. Люминесцентные лампы.
2. Натриевые лампы.
3. Ртутные лампы.
4. Неоновые и ксеноновые лампы.

Глава 7. Лазерная обработка материалов

В зависимости от режима лазерного облучения реализуются различные виды обработки: нагрев, переплав, размерная обработка, резка, сварка, термообработка, упрочнение поверхности, отжиг дефектов, легирование и наплавка, аморфизация. В этом разделе рассмотрим наиболее распространенные из этих технологий.

7.1. Взаимодействие лазерного излучения с веществом

При взаимодействии сфокусированного мощного лазерного излучения на поверхность твердого тела вещество нагревается, плавится, испаряется, ионизируется. Лазерное излучение (ЛИ) обладает специфическими свойствами: качественно — когерентностью, количественно — монохроматичностью и высокой интенсивностью. Все эти свойства используются при лазерной обработке металлов.

Световая волна, падающая на поверхность, взаимодействует с электронами, возбуждая их колебания. Если электроны в твердом теле полностью свободны, то излучение полностью отражается — поглощение отсутствует. Если электроны частично связаны, то часть энергии падающей волны передается твердому телу, вызывая его нагревание. Весь процесс происходит в очень тонком поверхностном слое. Поглощение зависит от со-

стояния поверхности, так как поверхность твердого тела отличается неоднородностью:

- физическая неоднородность — вакансии, дислокации,
- химическая неоднородность — дефекты, обусловленные примесями,
- индуцированная неоднородность — наличие на поверхности посторонних частиц, адсорбированных поверхностью,
- качество обработки поверхности — макроскопическая шероховатость — наличие участков, различно ориентированных к направлению падения световой волны. Поглощение в конечном итоге зависит от длины волны и состояния поверхности (рис. 7.1).

При нагреве непрозрачного тела выделяется 3 стадии: 1 — нагрев без изменения агрегатного состояния (в твердом состоянии), 2 — плавление, испарение, 3 — ионизация испаряемого вещества и образование плазмы.

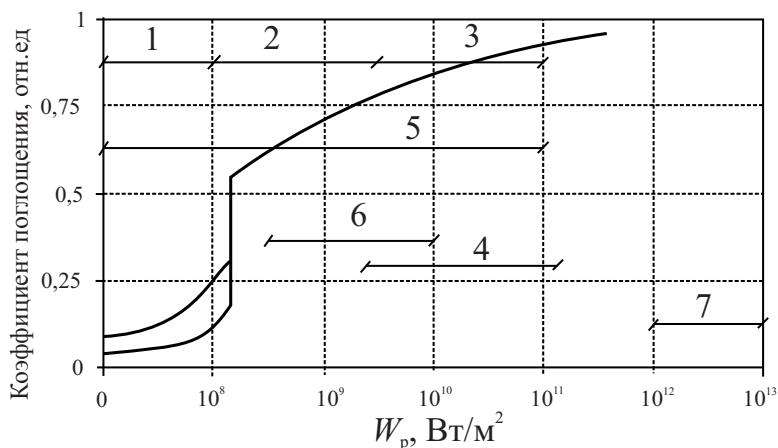


Рис. 7.1. Зависимость коэффициента поглощения от плотности вводимой мощности:

- 1 — термообработка (закалка, легирование); 2 — сварка; 3 — газолазерная резка; 4 — прошивка отверстий; 5 — технологическая обработка ИК-излучением; 6, 7 — прочие способы

7.2. Лазерная резка металлов

Лазерная резка — наиболее широко применяемый технологический процесс. Его основные преимущества:

- отсутствует механическое воздействие на обрабатываемый материал,
- благодаря высокой плотности лазерного излучения обеспечивается высокая производительность процесса,
- сравнительно простое управление процессом позволяет осуществлять резку по сложному контуру с высокой степенью автоматизации.

При газолазерной резке (ГЛР) различают 2 механизма резки: стационарный и нестационарный. При стационарном механизме резки жидкая ванна расплава существует по всей длине канала реза. Нестационарный механизм характеризуется периодическим выносом расплавленного металла из зоны обработки. При стационарном механизме скорости плавления металла в направлении реза и его удаления равны. При нестационарном механизме после удаления очередной массы жидкого металла из нижней части реза вследствие уширения лазерного пучка нижняя часть реза не успевает расплавиться. Затем при увеличении объема жидкой ванны металл выносится потоком газа из зоны реза. При этом в нижней части разрезаемого материала образуются так называемые бороздки.

Процесс резки осуществляется с помощью газа. В качестве режущего газа для сталей и некоторых других металлов используется кислород. Основные функции кислорода:

- удаление жидкого металла из зоны реза,
- при взаимодействии кислорода с железом происходит дополнительное выделение тепла (экзотермическая реакция),
- образование оксидной пленки на поверхности повышает поглощение лазерного излучения расплавленным металлом,
- струя кислорода сокращает время остывания металла, что способствует уменьшению остаточных деформаций изделий.

Возможен также механизм резки испарением, но для этого необходима более высокая концентрация энергии.

Основные показатели, определяющие производительность процесса резки:

- плотность мощности, мощность лазерного излучения,
- скорость резки, давление и состав поддуваемого газа,
- размеры и конфигурация сопла,
- расстояние от среза сопла до поверхности металла,
- поглощательная способность поверхности,
- свойства разрезаемых материалов.

Плотность мощности является комплексной величиной и зависит от мощности лазерного излучения, условий фокусировки, модового состава излучения, диаметра луча на выходе из резонатора и расходимости ЛИ. Плотность мощности определяется по формуле

$$W_p = P/S, \quad (7.1)$$

где W_p — плотность мощности, Вт/мм²; P — мощность лазерного излучения, Вт; S — площадь пятна ЛИ на детали, мм².

Скорость резки и толщина разрезаемого материала связаны обратной зависимостью (см. рис. 7.2). Кривые на графике относятся к разным диаметрам сфокусированного лазерного луча. Ширина реза уменьшается при уменьшении размера фокуса. Однако при очень узком резе и повышенной вязкости расплава жидкий металл трудно удалить из зоны реза. Здесь существуют ограничения по толщине разрезаемого материала. Однако при малых толщинах (1–2 мм) таких ограничений практически нет. При увеличении толщины разрезаемого материала от 2,5 до 7,5 мм диаметр фокусного пятна ($D_{\text{ф}}$) увеличивается с 0,1 до 0,2 мм.

При резке материалов больших толщин разрезаемого металла большое значение приобретает угол схождения лучей и распределение плотности мощности. С увеличением толщины разрезаемого металла необходимо уменьшение угла сходимости лу-

чей, что достигается использованием длиннофокусной линзы. Минимальный размер D_Φ ограничивается дифракционной расходимостью лазерного излучения и получение ее минимальной величины является проблемой лазерного источника.

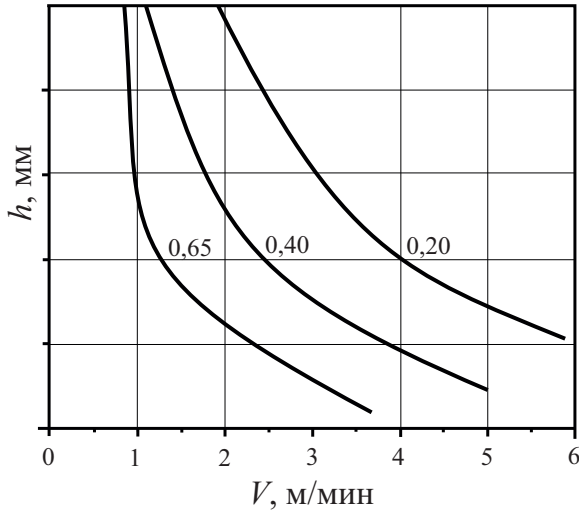


Рис. 7.2. Зависимость глубины реза от скорости резки при различных условиях фокусировки:
 $D_\Phi = 0,65; 0,40; 0,20$

При фокусировке лазерного излучения имеет значение также модовая структура лазерного излучения, геометрия фокусировки, выбор фокусирующей линзы и локализация фокуса относительно поверхности разрезаемого материала.

Сопловые системы (устройство подачи газа в зону резки) могут иметь различную конструкцию и отличаются способом подачи газа относительно луча. Газ может подаваться соосно с лучом, может быть боковая или кольцевая подачи (см. рис. 7.3). Качество реза зависит от формы и параметров струи газа. Струя газа должна на возможно большей длине сохранять цилиндри-

ческую форму. Диаметр сопла должен быть достаточным, чтобы луч не зарезался на кромках сопла. Диаметр сопла должен быть минимальным, чтобы рационально использовался газ. Давление газа в сопле должно обеспечить достаточную кинетическую энергию для выдувания расплава, и параметры давления газа изменяются в зависимости от толщины разрезаемого материала от 0,2 МПа до 2 и более МПа.

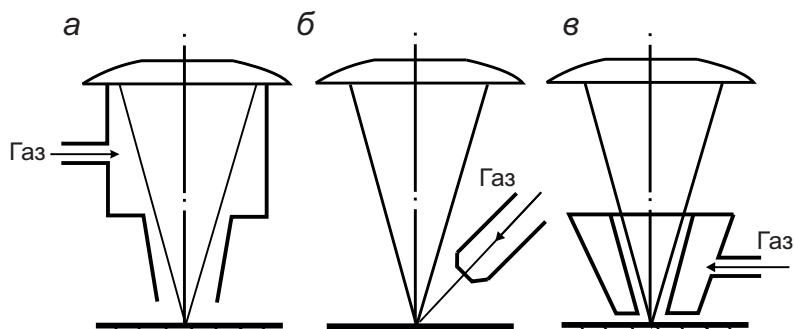


Рис. 7.3. Схемы подачи вспомогательного газа в зону резки:

а — соосная, *б* — боковая, *в* — кольцевая

Предел толщины разрезаемых материалов в настоящее время определяется экономической целесообразностью и достигает ориентировочно 20 мм. Большие толщины целесообразнее резать с помощью плазмы.

7.3. Лазерная сварка

Преимущества: благодаря высокой концентрации энергии в процессе лазерной сварки обеспечивается:

- малый объем расплавленного металла,
- незначительный объем зоны термического влияния,

— высокие скорости нагрева и охлаждения металла при сварке.

Следствием этого являются минимальные деформации свариваемых конструкций, возможность получения равнопрочных соединений (прочность сварного шва и свариваемого металла одинаковы).

Лазерная сварка позволяет сваривать детали толщиной от нескольких микрон до нескольких миллиметров. Основным параметром, характеризующим лазерную сварку, является плотность мощности (W_p). На практике лазерная сварка осуществляется при $W_p = 10^5 - 10^7$ Вт/см.

Основными параметрами режимов лазерной сварки с глубоким проплавлением являются: мощность лазерного излучения, скорость сварки, параметры фокусирующей системы. При данном значении мощности скорость сварки устанавливается в следующих диапазонах: скорость сварки минимальная — отсутствие кинжального проплавления, скорость сварки максимальная — ($V_{\text{св макс}}$) — отсутствие качественного формирования шва и появление дефектов (подрезов, пор, непроваров).

Лазерная сварка успешно конкурирует с электронно-лучевой сваркой и имеет ряд преимуществ перед ней. Главное из них — возможность работы без использования вакуума. Лазерная сварка применяется в микроэлектронике для сваривания сверхмалых деталей. Толщина свариваемых проводников и плоских выводов не превышает 0,03–0,05 мм. Кроме того, при использовании CO_2 -лазеров мощностью до 10 кВт успешно ведут сварку автомобильных кузовов, карданных валов и других деталей автомобилей. Лазерная сварка широко применяется для соединения стеклянных и керамических изделий, при этом плотность мощности лазеров находится на уровне $10^4 - 10^8$ Вт/см.

На качество лазерной сварки оказывают влияние условия фокусировки лазерного излучения. При лазерной сварке размер лазерного пятна D_ϕ составляет 0,5–1,0 мм. При меньшем D_ϕ происходит перегрев металла шва — появление дефектов. При $D_\phi = 1,0$ мм снижается эффективность процесса. При сварке

больших толщин возникает необходимость заглубления фокуса под поверхностью свариваемого листа. Схема сварки приведена на рис. 7.4. Лазерный луч, попадая на переднюю стенку металла, расплавляет ее и металл переносится по боковым поверхностям расплавленной ванны на заднюю стенку, где и затвердевает.

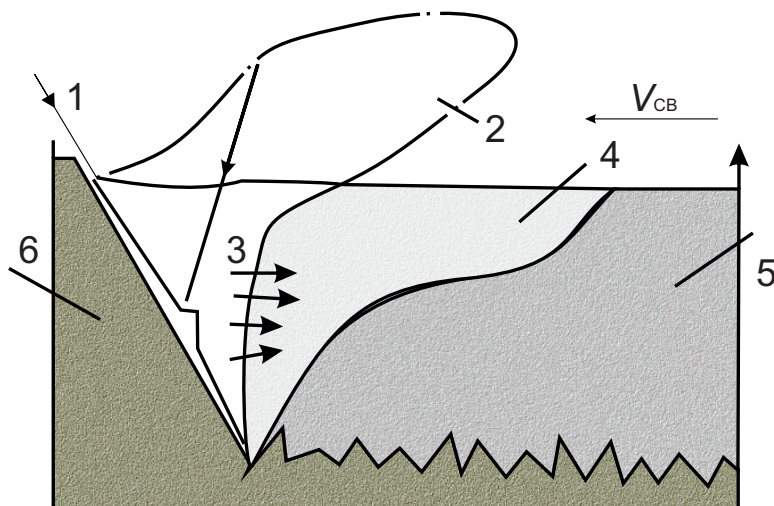


Рис. 7.4. Схема продольного сечения сварочной ванны:

- 1 — лазерный луч; 2 — плазменный факел; 3 — парогазовый канал;
4 — хвостовая часть сварочной ванны; 5 — закристаллизовавшийся металл;
6 — свариваемый материал

Для предотвращения образования оксидов в сварном шве необходима защита зоны лазерного воздействия. Для этого используют защитные газы. Газовая защита осуществляется подачей защитного газа через сопло непосредственно в зону лазерного воздействия. В качестве защитных газов используются: Ar, He, CO₂. При этом следует учитывать их потенциал ионизации. Газы, имеющие более высокие потенциалы ионизации и теплопроводность, обеспечивают большее проплавление.

Одним из технологических приемов при сварке является использование присадочного материала в виде порошка, проволоки. Это дает возможность регулировать в широких пределах химический состав шва, исключить многие дефекты (поры в корне шва), а также снизить точность при сборке деталей.

В практической деятельности полезны следующие рекомендации:

- Для низкоуглеродистых и низколегированных сталей, с содержанием углерода не более 0,25 %, содержание легирующих элементов не более 4 % при скорости сварки $V_{\text{св}} = 30\text{--}40$ мм/с достигается равнопрочное соединение.

- Для конструкционных средне- и высокоуглеродистых и легированных сталей характерно образование закалочных структур в шве и зоне термического влияния, склонных к хрупким разрушениям, при $V_{\text{св}}$ более 30 мм/с можно избежать образования холодных трещин.

- Для высоколегированных сталей лазерная сварка может обеспечить повышенные механические свойства сварного шва, а малая зона термического влияния — повышенные коррозионные свойства.

7.4. Основные закономерности лазерного упрочнения сталей

Наиболее широкое применение нашла лазерная закалка железоуглеродистых сталей и чугунов.

Преимущества лазерной закалки:

- высокая концентрация лазерного излучения позволяет проводить упрочнение в локальных местах стальных деталей, обеспечивает отсутствие коробления, обеспечивает обработку труднодоступных мест и автоматизацию процесса;

- сущность процесса лазерной закалки заключается в том, что лазерный луч в доли секунды нагревает поверхностный слой

металла, основная масса при этом остается холодной. После прекращения воздействия охлаждение происходит с большими скоростями вследствие высокой теплопроводности металла (выше, чем любые охлаждающие среды — вода, масло, растворы солей, воздух). Вследствие этого в сталях образуются закалочные структуры высокой твердости.

Лазерному упрочнению целесообразно подвергать железоуглеродистые сплавы с содержанием углерода не менее 0,3 %. В этот класс материалов входят доэвтектоидные, конструкционные, инструментальные стали и чугуны. При лазерной обработке сохраняются общие закономерности полиморфных превращений, характерных для объемной термообработки. Отличием является скорость протекания фазовых превращений.

Так, в доэвтектоидных, конструкционных и некоторых инструментальных сталях уровень твердости после лазерной закалки выше, чем после обычной закалки с отпуском. Лазерная закалка может производиться с оплавлением и без оплавления поверхности.

При обработке с оплавлением поверхности зона лазерного воздействия состоит из нескольких структурных зон, а на поверхности расположена зона оплавления. Она имеет столбчатое кристаллическое строение. При этом кристаллы вытянуты в направлении максимального теплоотвода. Зона отличается повышенной твердостью вследствие образования закалочных структур — мартенсита с незначительным количеством остаточного аустенита.

Вторая зона — закалка из твердого состояния. Обычно имеет мартенситную структуру. При больших скоростях обработки структура характеризуется значительной степенью неоднородности.

Третья зона — переходная к основному металлу. Распределение твердости в ней зависит от исходного состояния металла. Если сталь после закалки подвергали низкому отпуску, то образуется зона пониженной твердости незначительной глу-

бины (зона термического влияния), а затем твердость по мере продвижения в глубь металла возвращается к исходной. Если сталь была высокоотпущенной, то твердость понижается плавно до исходного состояния.

При лазерном термическом упрочнении приповерхностный слой материала нагревается лазерным лучом до заданной температуры и затем охлаждается со сверхбыстрыми скоростями за счет отвода тепла в основную массу материала. Обычно скорость лазерного нагрева составляет 10^5 – 10^8 град/с, а охлаждения — 10^4 – 10^5 град/с.

При таких экстремальных термических условиях неминуемо возникают большие градиенты температуры, достигающие 10^6 – 10^8 град/м, которые вызывают возникновение механических напряжений, достаточных для генерации высокой концентрации дислокаций. Механизм лазерного упрочнения в этих условиях может быть связан со следующим. Известно, что перемещение дислокаций определяет пластичность материала. При высокой концентрации дислокации они будут мешать друг другу двигаться, тем самым упрочняя материал.

Существует и другая точка зрения: при больших скоростях охлаждения расплава он не успевает закристаллизоваться и остается в аморфном состоянии, которое, как правило, прочнее кристаллического.

7.5. Размерная обработка

Основные технологические приемы лазерной размерной обработки — резка деталей и прошивание отверстий в них. В этом случае используются большие мощности излучения, обеспечивающие кипение расплава и удаление расплава из зоны обработки за счет реактивного давления.

Лазерный луч можно использовать для изготовления отверстий малых диаметров в следующих деталях: диафрагмах, фор-

сунках, ситах, часовых и приборных камнях, фильерах, волокнах и т. д. Длительность импульса излучения твердотельного лазера невелика — тысячные доли секунды. Исследования показали, что отверстия с малой конусностью получаются при воздействии на обрабатываемый материал короткими импульсами 0,5–1,5 мс. С увеличением длительности импульса растет конусность отверстия, уменьшается его глубина. При обработке импульсами большой длительности (до 8 мс) наблюдается лишь проплавление материала без образования отверстия. Поэтому режим с большими длительностями импульса применяется при сварке и локальной термообработке.

В табл. 7.1 приведены значения скоростей резки различных материалов в зависимости от толщины изделия и мощности лазера.

Таблица 7.1

Скорости лазерной резки некоторых материалов

Материал	Толщина изделия, мм	Мощность лазера, Вт	Скорость резки, м/мин
Сталь	2,2	850	1,8
Титан	0,5	850	3,24
Фанера	6,5	850	5,22
Керамика	6,4	85	0,6
Резина	2,0	100	1,9

На размерные характеристики обработки влияет также количество импульсов. С увеличением количества импульсов, последовательно подаваемых в зону обработки, увеличивается глубина отверстия. Многоимпульсная обработка практически не увеличивает входной диаметр отверстия. Многоимпульсная обработка импульсами малой энергии улучшает форму поперечного сечения по глубине, дает большую цилиндричность отверстия.

Точность изготовления микроотверстий лучом ОКГ довольно высока. При правильном выборе режимов обработки и стабилизации энергетических и временных характеристик

излучения ОКГ погрешность размерных параметров может составить 8–10 % номинала. Повысить точность можно различными технологическими приемами, такими как ограничение длительности светового импульса, пневматическое калибрование отверстий, обработка лучом ОКГ с использованием экрана, калибрование отверстий обратным действием светового луча и т. д.

Машинное время изготовления одного отверстия при многоимпульсной обработке определяется длительностью импульса и составляет 0,001–0,0015 с. Следует, однако, учитывать, что при лазерной обработке еще велика доля вспомогательного времени, что ограничивает ее производительность (несовершенное фокусирование излучения ОКГ на обрабатываемой поверхности). Ручная настройка фокусирующей системы на рабочий режим, помимо увеличения вспомогательного времени технологического процесса, препятствует автоматизации лазерных установок. Критерием для оценки точности фокусирования служит резкость изображения обрабатываемой поверхности в поле зрения визуальной системы, что в значительной степени субъективно. Преимущества лазерной прошивки отверстий:

1. Скорость прошивки не зависит от прочности материала.
2. Можно получать отверстия диаметром от 0,1 мм и выше.
3. Отверстия прошиваются под любым углом к поверхности.
4. Применяется для обработки сверхпрочных материалов (алмазы, фильеры и форсунки из прочных и жаростойких материалов, рубиновые камни).

7.6. Применение лазеров в медицине

Применению лазеров в медицине посвящены более десятка монографий и большое количество оригинальных статей. При этом отчетливо прослеживаются два главных направления.

— Лазерная хирургия, использующая лазеры большой мощности. Иногда это направление называют «силовая лазерная медицина».

— Лазерная терапия, использующая лазеры как источники низкоинтенсивного излучения.

Сюда же можно отнести и аппаратуру, создаваемую на основе светоизлучающих диодов большой мощности (СИДы с выходной мощностью до сотен мВт).

Лазерная хирургия

Хирурги, а именно офтальмологи, первыми из медиков стали использовать лазеры как скальпели. Первые эксперименты по хирургии сетчатки проводились на кроликах. Таким способом сейчас осуществляются операции, в частности, по «приварке» отслоившейся сетчатки глаза человека. В дальнейшем лазерные скальпели на базе твердотельных и мощных CO_2 -лазеров прочно вошли в широкую хирургическую практику.

Следует подчеркнуть основные особенности лазерного скальпеля — абсолютная стерильность, высокое пространственное разрешение, что особенно важно в микрохирургии, коагуляция крови в мелких кровеносных сосудах, что важно при операциях на кровенаполненных органах (например, на печени).

Применение лазеров в хирургии основано на разрушении, т. е. на иссечении, испарении и коагуляции биологических тканей лучом лазера. Механизм действия лазерного излучения состоит в поглощении излучения и нагревании облучаемой ткани до высоких температур.

Поскольку коэффициент поглощения зависит от длины волны падающего излучения, необходимо подбирать длину волны в соответствии с природой биологического объекта. Поэтому для рассечения биотканей обычно используют лазеры с длиной волны около 1 мкм (например, неодимовый лазер). В этом случае поглощение лазерного излучения водой и другими внутриклеточными субстанциями гарантирует строгую локализацию

зоны разреза и безопасность тканей за пределами этой зоны.

В настоящее время в хирургии широко используются CO_2 -лазеры с длиной волны 10,6 мкм. При мощности лазера 5 Вт и времени воздействия 10 с объем нагреваемой ткани не превышает 10^5 см^3 , а температура достигает 100°C .

Для CO_2 -лазера пороговая плотность мощности излучения, необходимая для испарения ткани, составляет 4–7,5 кВт/см. Если плотность мощности превосходит пороговое значение, то мгновенное испарение воды приводит к разрушению облучаемого объема биоткани и выносу отдельных фрагментов и клеток ткани. Вместе с этим создается значительное реактивное давление на нижележащие ткани, которое достигает величины 100 кПа (более 1 атм). Реактивное давление приводит к деформации мелких нижележащих кровеносных сосудов. Мелкие сосуды будут рассекаться, и вследствие термической коагуляции будет происходить остановка кровотечения. Именно поэтому лазерный скальпель незаменим для проведения операций на кровенаполненных органах (почка, печень, селезенка).

Определенные перспективы применения в микрохирургии связывают с эксимерными УФ-лазерами импульсного действия: ArF (193 нм), KrCl (222 нм), XeCl (308 нм). Малая глубина проникновения УФ-излучения позволяет осуществлять послойный разрез тканей. Лазерные скальпели на основе ArF-лазера с плотностью мощности около 5 Дж/см позволяют проводить надрезы роговицы глубиной до 0,3 мм, что вполне приемлемо для большинства офтальмологических операций. При этом края надрезов не подвергаются нагреву и разрушению. Благодаря большой мощности излучения и возможности его транспортировки по оптическим моноволоконкам такие лазеры находят применение для проведения операций по дроблению камней в почках и желчных протоках.

Аналогичные операции по разрушению атеросклеротических бляшек внутри кровеносных сосудов получили название «лазерной ангиопластики». Целью таких операций является

разрушение новообразований на стенках кровеносных сосудов для восстановления нормального кровотока. Важно при этом точно определить зону воздействия излучения, его мощность, чтобы не повредить стенку самого сосуда. Для решения этих задач наиболее подходят ХеСl-лазер с плотностью энергии 1–8 Дж/см². Он эффективно разрушает как фиброзные, так и кальцинозные бляшки.

Еще одно применение лазеров средней мощности (единицы Вт) — сварка кровеносных сосудов. Здесь наибольшее распространение получил аргонный лазер непрерывного действия (длина волны 0,5 мкм). Оптимальная мощность лазера при сварке вен — 0,3–0,5 Вт, плотность мощности 5–10 Вт/см².

В заключение приведем в табл. 7.2 основные лазерные установки, используемые в хирургии, и их параметры.

Таблица 7.2

Лазерные хирургические установки

Наименование установки	Тип лазера	λ , мкм	Мощность, Вт или энергия, Дж	Применение
Скальпель-1	CO ₂	10,6	20 Вт	Операции на обильно кровоточащих органах
Ромашка-1	CO ₂	10,6	20–80 Вт	Полостные хирургические операции
Радуга-1	Nd+YAG	1,06	10–50 Вт	Лечение острых язв желудка и ДПК
Ятаган	Рубиновый	0,69	1–15 мДж	Микрохирургия глаза
Литотритор	Nd+YAG	1,06	до 0,3 Вт	Разрушение камней в почках

Низкоинтенсивная лазерная терапия

В настоящее время низкоинтенсивное лазерное излучение (НЛИ) более эффективно используется в медицине, чем мощное излучение. Причин здесь несколько. Во-первых, возмож-

ные побочные эффекты здесь существенно ниже. Во-вторых, используемые здесь лазеры, в основном гелий-неоновые, компактны, просты в управлении, относительно дешевы, ресурс их работы исчисляется тысячами часов. В-третьих, излучение этих лазеров лежит в видимой области спектра, поэтому практически без потерь транспортируется по световодам. В-четвертых, на основе большого экспериментального и клинического материала установлено, что НЛИ обладает отчетливым биостимулирующим действием на кровь, ткани, органы и организм в целом.

Возможные механизмы взаимодействия низкоинтенсивного лазерного излучения (НЛИ) с биообъектами

Использование низкоинтенсивного лазерного излучения для лечебных целей, несмотря на многолетний мировой опыт, не имеет сегодня, как это ни странно звучит, надежного научного обоснования. Несмотря на значительный экспериментальный материал, механизмы взаимодействия НЛИ с биообъектами однозначно не установлены. Отчасти это связано с большой противоречивостью экспериментальных данных, накопленных в различных научных коллективах. В большей же степени это следствие сложности биосистемы и процессов, протекающих в ней.

Итак, что же происходит с биообъектом при облучении его НЛИ? В чем проявляются специфические свойства лазерного излучения: высокая пространственная и временная когерентность, поляризация, малая расходимость и высокая спектральная яркость излучения?

В настоящее время нет убедительных доказательств проявления этих особенностей лазерного излучения при его взаимодействии с биообъектом. Так, при однофотонном поглощении скорость создания когерентности составляет $0,03\text{--}0,003\text{ с}^{-1}$. Скорость же потери когерентности за счет расфазировки волновых функций молекул — $10^{11}\text{--}10^{12}\text{ с}^{-1}$. Такое громадное различие скоростей создания и потери когерентности исключает

влияние когерентных свойств излучения при его взаимодействии с биологическими объектами.

Также маловероятным кажется, что, распространяясь в изотропных биологических тканях, излучение сохранит поляризацию, тем более, если излучение передается к объекту через волоконную оптику, где происходит дополнительная деполяризация. Вместе с тем эксперименты по поглощению излучения лазера и лампы накаливания с той же мощностью и длиной волны свидетельствуют, что лазерное излучение поглощается в тканях сильнее. Имеются и отдельные данные, свидетельствующие о том, что большое биостимулирующее действие лазерного излучения обеспечивается именно поляризацией света.

Какова роль высокой монохроматичности излучения? По мнению ряда исследователей, эта характеристика не имеет принципиального значения, так как полосы поглощения биомолекул широкие. Однако, есть исследователи, отстаивающие теорию резонансного взаимодействия излучения с веществом, более того, введен даже термин «резонансная фототерапия». Согласно этой теории, благодаря высокой когерентности, лазерное излучение способно возбуждать отдельные степени свободы движения молекул, не затрагивая других возможных колебаний. В таком случае молекула приобретает способность вступления в определенную химическую реакцию.

Рассмотрим пример воздействия лазерного излучения на кровь. Было показано, что при облучении красных эритроцитов излучением гелий-неонового лазера за процесс клеточной биостимуляции отвечает фотогенерация синглетного кислорода из триплетного состояния:



Этот механизм работает в нескольких узких спектральных интервалах.

Таким образом, при проведении внутривенной лазерной терапии, например, при лечении ишемической болезни сердца с использованием гелий-неонового лазера с длиной волны 632,6 нм, наблюдаемый терапевтический эффект обусловлен поглощением фотонов молекулярным кислородом, растворенным в крови.

7.7. Лазерный отжиг

Используется для нормализации кристаллической решетки после различных энергетических воздействий, например, после облучения. Наибольшее распространение этот метод получил для восстановления кристаллической решетки полупроводников после ионного легирования (легирование полупроводников в результате облучения примесными ионами). При ионной имплантации быстрые ионы, наряду с позитивным эффектом легирования, создают в кристаллической решетке нежелательные точечные дефекты, которые ухудшают свойства полупроводника. Эти дефекты отжигаются при лазерном облучении. Лазерные лучи ввиду малой проникающей способности нагревают только нарушенные ионной бомбардировкой приповерхностные слои, мало искажая теплом объемные области полупроводника.

Для проведения лазерной закалки необходим некоторый комплекс технологических операций. Известно, что металлическая поверхность после механической обработки отражает до 90 % падающего на нее инфракрасного лазерного излучения с длиной волны 10,6 мкм. Для эффективного использования (повышения степени поглощения) на поверхность металла необходимо наносить поглощающие покрытия. В качестве поглощающего покрытия могут быть использованы оксиды, фосфаты, сульфиды, графит, а также различные клеи или лаки. Такими мероприятиями можно достичь 90–95 % поглощения

падающего на металл излучения. При закалке высоколегированных инструментальных сталей следует иметь в виду, что обработка их проводится в очень узком интервале режимов, так как при оплавлении поверхности образуется большое количество остаточного аустенита, приводящее к понижению твердости (рис. 7.5) и, соответственно, снижению служебных свойств.

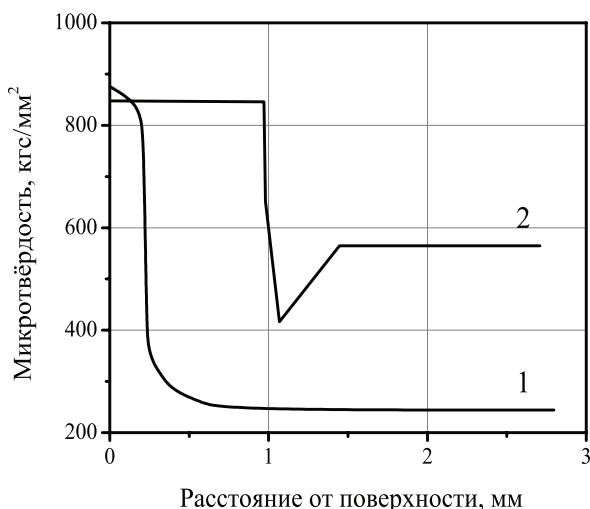


Рис. 7.5. Распределение твердости по сечению стали У8:

1 — отожженное состояние; 2 — исходное термообработанное состояние

Лазерная обработка чугунов с оплавлением поверхности приводит к частичному растворению графита и образованию после охлаждения карбидов, что значительно повышает твердость металла в зоне обработки. Твердость чугунов после лазерной обработки существенно зависит от их структуры. Чем больше перлита в структуре, тем более высокая твердость получается в зоне обработки, так как на месте перлитных зерен образуются кристаллы мартенсита высокой твердости. Так, при обработке перлитных чугунов можно получить твердость до 10–11 ГПа.

Из других материалов наибольшее распространение получила лазерная обработка литейных алюминиевых сплавов. Обработка проводится обязательно с оплавлением поверхности для измельчения структурных составляющих, что приводит к повышению износостойкости изделия.

Одной из перспективных областей использования лазерного излучения является легирование и наплавка. Метод легирования состоит из нанесения на поверхность каких-либо компонентов и последующего оплавления этой поверхности лазерным лучом. Компоненты можно нанести предварительно в виде покрытия или непосредственно в зону воздействия лазерного луча. Вносимыми компонентами должны быть элементы или соединения, увеличивающие служебные свойства поверхности. Такими элементами обычно являются карбиды, нитриды, бориды переходных металлов, обладающие высокой твердостью, например, твердость карбида титана достигает 30–32 ГПа.

Одним из способов внесения компонентов в зону лазерной обработки является наплавка. Наплавка применяется с целью создания на поверхности металла покрытий с требуемыми свойствами по прочности, износостойкости, жаростойкости или коррозионной стойкости.

Другим направлением лазерной наплавки является восстановление исходных размеров изношенных деталей. В качестве вносимых компонентов наибольшее развитие получили порошковые материалы. Для внесения их лазерные комплексы оснащают дополнительным оборудованием: модулем для обработки тел вращения, питателем для подачи порошка в зону лазерного воздействия, сканатором лазерного луча для формирования необходимой траектории перемещения. Существуют методы расчета производительности процесса наплавки в зависимости от мощности лазерного излучения.

Глава 8. Электровзрывная технология

8.1. Электрический взрыв проводников

Хорошо известны легкоплавкие предохранители электрических цепей от перегрузок. Их работа связана с расплавлением проволоки при больших токах. Указанные устройства приближенно моделируют первую стадию технологий, основанных на электрическом взрыве проводников (ЭВП), однако, эти технологии несравненно сложнее по физико-химическим процессам, происходящим при их реализации.

Электрический взрыв проводника представляет собой явление взрывообразного разрушения металлического проводника при прохождении через него импульса тока большой плотности, сопровождающегося световым излучением, звуковым эффектом и ударной волной. Электрический взрыв проводников, как метод получения порошков, известен еще с 1774 г., когда были опубликованы первые данные по распылению проволочек.

В 1949 г. в Советском Союзе по данному методу была подана заявка на изобретение. В конце 60–70-х годов прошлого столетия в Томском политехническом институте усилиями Иванова Г. В., Котова Ю. А., Яворовского Н. А. начаты работы по созданию физических и методических основ электровзрывной технологии получения ультрадисперсных порошков. В последующие годы эта проблема успешно разрабатывалась в НИИ

ВН ТПУ под руководством Ильина А. П., Семкина Б. В., Яворовского Н. А.

Наиболее просто ЭВП осуществить в LC -контуре по схеме, показанной на рис. 8.1 и лежащей в основе установок для получения ультрадисперсных порошков. Подобные установки состоят из высоковольтного источника питания, емкостного накопителя энергии C , управляемого разрядника P , индуктивного сопротивления L , взрывающегося проводника Π , герметичной взрывной камеры из нержавеющей стали. Образовавшийся во взрывной камере золь металла подается вентилятором в динамический фильтр, где осаждается. Установка оборудована устройством для непрерывной подачи проволоки.

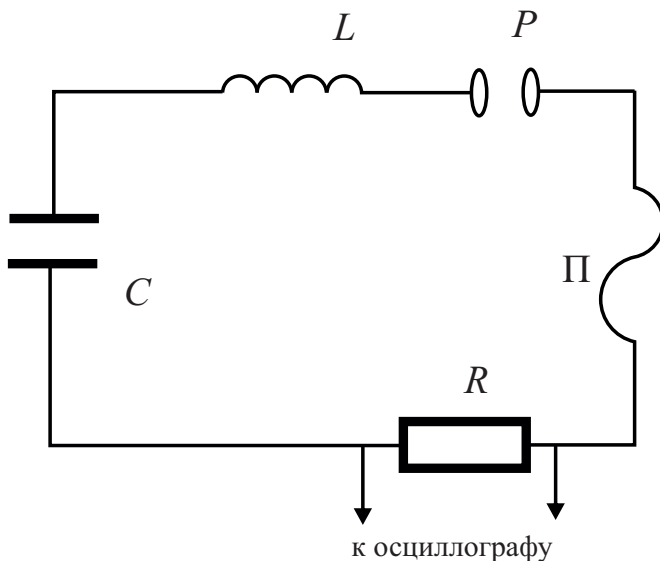


Рис. 8.1. LC -контур установки для электровзрывного получения УДП

Взрывы проволочек могут повторяться с частотой до 1 Гц. Дисперсность порошков, получаемых методом ЭВП, опреде-

ляется удельным энергосодержанием взрывающегося проводника, диаметром проводника и давлением среды, в качестве которой, как правило, применяется аргон. Если же необходимо получить порошки соединений (оксиды, нитриды и т. д.), то выбирается соответствующая газовая среда. Весь технологический процесс получения порошков путем электрического взрыва проволок делится на следующие этапы:

1. Емкостной накопитель энергии C заряжается от источника питания до напряжения U_0 . При замыкании цепи разрядником P ток вначале определяется волновым сопротивлением контура, поскольку сопротивление проводника мало. Проводник нагревается джоулевым теплом, плавится в точке t_1 (рис. 8.2).

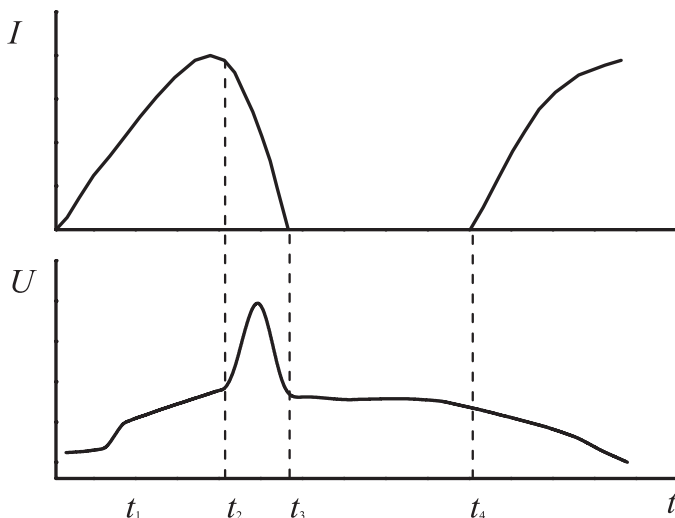


Рис. 8.2. Осциллограммы тока (I) и напряжения (U) в LC -контуре

2. Далее проводник нагревается в жидком состоянии до момента t_2 , характеризующего бурное испарение жидкого металла. При этом вещество расширяется, теряет металлическую про-

водимость, его сопротивление возрастает на несколько порядков, ток в контуре уменьшается.

3. В момент t_3 ток прекращается, наступает пауза. Во время паузы напряжение конденсатора приложено к продуктам взрыва.

4. В момент t_4 происходит пробой газообразных продуктов взрыва, наступает дуговая стадия разряда.

5. Образуются продукты ЭВП: пары и мельчайшие частицы металла, которые могут вступать в различные реакции со средой с образованием соединений металла (нитриды, оксиды и т. д.)

8.2. Физические основы получения ультрадисперсных порошков с помощью электрического взрыва проводника

В настоящее время имеет распространение гипотеза об изменении физического состояния металлов при электрическом взрыве проводников за счет квазиравновесных процессов. Однако на неравновесность процессов при ЭВП указывают следующие факты:

1. Наличие 30–40 % вещества проводников в ионизованном состоянии при введении в проводник энергии, сравнимой с энергией тепловой сублимации вещества.

2. Как установлено в экспериментах с медными проволочками, энергия излучения в ИК-диапазоне, относящаяся к стадии собственно взрыва, примерно в сто раз превышает ожидаемую энергию теплового излучения.

3. Люминесценция продуктов взрыва металлов возбуждается в результате быстрого диспергирования жидкого металла и возникновения электрического поля.

Таким образом, наличие значительной доли вещества в ионизованном состоянии и аномалии в спектре излучения при ЭВП свидетельствуют о неравновесности рассматриваемого процесса.

Весь процесс электрического взрыва проводников можно разделить на две стадии:

1. От начала действия тока до потери проводником высокой проводимости — вынужденный процесс.
2. Полное остывание продуктов взрыва — самопроизвольный процесс.

На первой стадии ввод энергии высокой плотности приводит к неравновесности процессов: диссипация энергии происходит по всем возможным каналам (нагрев в конденсированном состоянии, плавление, испарение, ионизация), также и по энергетически невыгодным каналам в условиях равновесности. В условиях электрического взрыва проводников не достигается равновесия между процессами диссипации энергии, что означает одновременное сосуществование вещества в различных фазах.

Плотность тепловой мощности тока при небольшой ее величине равна произведению электропроводности на квадрат напряженности электрического поля (закон Джоуля—Ленца). В соответствии с этим законом на всех стадиях ЭВП в результате взаимодействия электронов с основными ионами энергии должна передаваться кристаллической решетке. Именно на этой стадии ввода часть энергии расходуется на разрыв химической связи и на ионизацию, поэтому в тепло переходит меньше энергии, чем это следует из закона Джоуля—Ленца.

На стадии охлаждения продуктов электрического взрыва проводников не происходит полной релаксации, а часть энергии замораживается в виде запасенной энергии: энергии поверхности, внутренних дефектов, зарядовых состояний. Неравновесность процессов, протекающих при охлаждении, и сохранение металлом запасенной энергии также приводят к отклонению от закона Джоуля—Ленца.

Таким образом, критерием неравновесности при электрическом взрыве является отклонение от закона Джоуля—Ленца как при вводе энергии в металл, так и при охлаждении продук-

тов ЭВП. Показано, что УДП алюминия, полученные методом ЭВП, имеют запасенную энергию (около 50 кал/моль), превышающую теплоту плавления.

8.3. Свойства ультрадисперсных порошков

Поскольку состояния практически всех дисперсных систем являются неравновесными, то они характеризуются запасом энергии за счет, прежде всего, избытка поверхностной энергии, а также повышенной дефектности материала. Для наноразмерных порошков характерна ситуация, когда число атомов в объеме и вблизи поверхности соизмеримы. Этот факт придает наноструктурам особые, уникальные, свойства, которые можно использовать для разработки принципиально новых технологий. С уменьшением диаметра частиц увеличивается кривизна и энергия поверхности, что переводит эти частицы в разряд активных. Поэтому для УДП характерна активизация различных поверхностных процессов. Например, контакт порошков ультрамалого размера приводит к их быстрому спеканию уже при низких температурах. По-видимому, предельным максимальным размером, определяющим резкое повышение активности малых частиц при спекании уже при комнатной температуре, является размерная граница в 10–30 нм. С другой стороны, если поверхностная энергия малой частицы сравнима с теплотой плавления, то материал должен перейти в жидкое состояние. Таким образом, УДП обладают большой запасенной энергией, обусловленной сильно развитой поверхностью и высокой концентрацией дефектов как в объеме, так и на поверхности сверхтонких частиц. Приведенные примеры свидетельствуют о том, что сверхтонкие порошки представляют новое состояние вещества с уникальными, еще не изученными до конца свойствами.

Особые свойства ультрадисперсных порошков во многом определяются экстремальной технологией их получения. Дей-

ствительно, электрический взрыв проволок формирует ультрадисперсные порошки при температуре 10000 К и скорости охлаждения 100 К/с.

На рис. 8.3 представлены некоторые параметры ультрадисперсных порошков алюминия. Следует отметить, что размер частиц порошка, полученного методом взрыва проволок, составляет 10–500 нм. Эти частицы состоят из кристаллических областей размером 10–80 нм. Однако изолированные частицы ввиду высокой активности объединяются в агломераты или фракталы размером до 10 мкм.

В агломератах между частицами действуют слабые межмолекулярные силы, что определяет невысокую прочность фракталов. Кристаллические порошинки имеют высокую точечную дефектность, которая при уменьшении размера частицы увеличивается до 16 %. Полученные электровзрывом частицы порошка характеризуются большими внутренними механическими напряжениями.

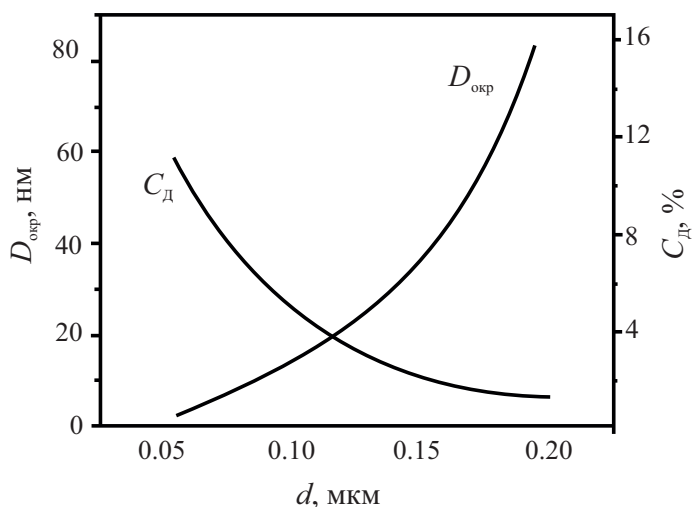


Рис. 8.3. Некоторые параметры ультрадисперсных порошков алюминия

При нагревании порошка до температуры 200–500 °С избыточная энергия выделяется в виде тепла или других форм и стимулирует протекание различных процессов. Это свойство ультрадисперсных порошков широко используется в разработке перспективных технологий.

8.4. Область применения ультрадисперсных порошков

1. Сверхтонкие порошки различного состава используются в керамическом производстве в качестве добавок, снижающих температуру и уменьшающих время спекания изделий порошковой металлургии.

2. Разработка присадок к смазочным материалам значительно увеличивает срок службы изделий машиностроения, способствует стимулированию различных технологических процессов.

3. Применяются ультрадисперсные порошки как активаторы и катализаторы различных термохимических процессов.

4. Используются при создании новых композиционных материалов, сверхпроводников, фильтров и других изделий с уникальными свойствами.

Заключение

Основой электрофизических методов обработки материалов является импульсная энергетика и электроника.

Импульсная энергетика не является альтернативой обычной энергетике с переменным или постоянным током: она предназначена для решения принципиально иных задач. Развитие этой экзотической энергетики потребовало разработки специальной элементной базы: накопителей энергии, коммутаторов, трансформаторов, линий для передачи энергии, систем для преобразования формы импульсов и т. д. Хотя многие из этих элементов имеют аналоги в традиционной электротехнике, их функционирование в режиме мощных импульсов приобретает специфический характер.

Главное отличие состоит в том, что все элементы мощной импульсной энергетики должны работать в наносекундном диапазоне времени. Спектр гармоник наносекундных импульсов распространяется вплоть до сверхвысоких частот, поэтому для генерирования и передачи таких импульсов необходимо, чтобы аппаратура обеспечивала широкую полосу пропускания частот и в то же время могла выдерживать без пробоя высокие напряжения. Для получения таких коротких времен в активных элементах рассматриваемой нами энергетики используются самые различные физические явления, такие как электрический разряд в газе, вакууме, жидких и твердых диэлектриках, электрический взрыв проводников, эффекты быстрого перемагничивания ферромагнетиков, быстропротекающие процессы

в полупроводниках, неустойчивости в плазме, переходные процессы в линиях передачи и т. д.

С другой стороны, оказалось, что картина физических процессов в названных выше активных элементах сохраняется в широких диапазонах параметров импульсов. Благодаря этому удалось выстроить стройную идеологию импульсной энергетики в широком диапазоне мощностей от 10^6 до 10^{14} Вт.

Исторически одним из первых практических применений импульсной энергетики было исследование скорости развития разряда в твердых, жидких и газообразных диэлектриках при воздействии высоких импульсных электрических полей. Далее следует назвать высокоскоростную фотографию, где импульсы высокого напряжения наносекундной длительности вначале с электрооптическими затворами, а затем с электронно-оптическими преобразователями использовались для исследования сверхбыстрых процессов в плазме, взрыва проводников, различных электрических разрядов. В радиолокации короткие импульсы уже давно используют для определения с большой точностью расстояний до цели. Получение кратковременных импульсов рентгеновских лучей позволило получить ряд фундаментальных результатов в области баллистики и физики взрывов.

Высоковольтная наносекундная импульсная техника сыграла исключительную роль при создании искровых и стримерных камер, нашедших широкое применение в ядерной физике. Ряд примеров можно было бы продолжить и дальше. Укажем еще только на один — это квантовая электроника. Техника мощных наносекундных импульсов позволила осуществить прорыв в лазерной физике и технике — разработать первые мощные импульсные твердотельные лазеры, а также целую гамму мощных газовых лазеров от ультрафиолетовых до инфракрасных длин волн.

Итак, импульсная электроника большой мощности заявила о себе созданием сильноточных электронных ускорителей, а та

импульсная техника, которая была при этом использована, легла в основу наносекундной импульсной энергетики.

Импульсная электроника большой мощности сегодня решает целый ряд важнейших задач. Во-первых, это исследование свойств электронных пучков при токах до 10^6 А и детальное изучение особенностей взрывной электронной эмиссии. Во-вторых, исследование свойств мощных ионных пучков, получаемых из плазмы, образующейся при взаимодействии мощных пучков электронов с анодом. В-третьих, генерирование мощных импульсов электромагнитных излучений: рентгеновского, лазерного и СВЧ. Наконец, это создание импульсных наносекундных ускорителей электронов с мощностью в импульсе до 10^9 Вт и энергией электронов 10^5 – 10^6 эВ, работающих в импульсно-периодическом режиме с частотами срабатывания 10^2 – 10^3 Гц. Такие устройства с успехом выполняют те же функции, что и обычные ускорители с непрерывными пучками: используются для электронно-пучковой стерилизации, для очистки воздуха и воды от вредных примесей, создания рентгеновских аппаратов, в технологиях отверждения лаковых покрытий и модификации поверхности металлических изделий и т. д.

С использованием элементной базы мощной импульсной техники создаются установки для исследований в области инерциального термоядерного синтеза. Хотя создание промышленных установок такого типа — дело более отдаленной перспективы, необходимые для этого технические решения прорабатываются уже сегодня.

Так или иначе устройства импульсной энергетики, оставаясь высоко востребованными в сфере фундаментальных физических и прикладных исследований, в последние годы все шире применяются в технологиях. Поэтому закономерно, что подготовка специалистов соответствующего профиля занимает все большее место в системе высшего физико-технического образования, в том числе и в физико-технологическом институте Уральского федерального университета.

Библиографический список

Балановский А. Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов / А. Е. Балановский. Иркутск : ИрГТУ, 2006. 180 с.

Бирюков Б. Н. Электрофизические и электрохимические методы размерной обработки / Б. Н. Бирюков. Москва : Машиностроение, 1981. 128 с.

Вишницкий А. Л. Электрохимическая и электромеханическая обработка металлов / А. Л. Вишницкий, И. З. Ясногородский, И. П. Григорчук. Ленинград : Машиностроение, 1971. 212 с.

Григорьянц А. Г. Основы лазерной обработки материалов / А. Г. Григорьянц. Москва : Машиностроение, 1989. 304 с.

Котов Ю. А. Импульсные технологии и наноматериалы: избранные труды / Ю. А. Котов. Екатеринбург : РИО УрО РАН, 2013. 456 с.

Котов Ю. А. Нанопорошки, получаемые с использованием импульсных методов нагрева мишени / Ю. А. Котов // Перспективные материалы. 2003. № 4. С. 79–82.

Технология получения, характеристики и некоторые области применения электровзрывных нанопорошков металлов / М. И. Лернер, Н. В. Сваровская, С. Г. Псахье, О. В. Бакина // Российские нанотехнологии. 2009. Т. 4, № 11–12. С. 56–68.

Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г. А. Амитан, И. А. Байсулов, Ю. М. Барон, А. И. Бляшко, В. А. Вагин, Г. С. Кратыш, Г. Д. Лубяницкий, Е. Ф. Немилов, Н. М. Попов, С. И. Пугачев, Л. А. Ушо-

мирская, А. Я. Финекльштейн, А. М. Шлестеев. Ленинград : Машиностроение, 1988. 719 с.

Электроимпульсная обработка металлов / А. Л. Лившиц, Л. Т. Кравец, И. С. Рогачев, А. Б. Сосенко. Москва : Машиностроение, 1967. 296 с.

Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов / Б. А. Артамонов, Ю. С. Волков, В. И. Дрожалова, Ф. В. Седыкин, В. П. Смоленцев, В. М. Ямпольский. Москва : Высшая школа, 1983. 247 с.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ВЗРЫВ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ	10
ГЛАВА 2. СПОСОБЫ ИНИЦИИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ	18
2.1. Инициирование разряда в жидкостях при электрической форме пробоя	18
2.2. Инициирование разряда в твердых диэлектриках при электрической форме пробоя	26
2.3. Инициирование разряда электротепловым пробоем жидких и твердых диэлектриков.....	40
2.4. Инициирование разрядов введением инородностей.....	44
2.5. Использование вспомогательных источников электрических сигналов для инициирования разрядов....	52
ГЛАВА 3. ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫЙ СПОСОБ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ	62
3.1. Физические условия осуществления размерной электроэрозионной обработки	64
3.2. Способы подвода энергии	65
ГЛАВА 4. ЭЛЕКТРОИСКРОВАЯ ОБРАБОТКА В ЖИДКОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СРЕДЕ	71
4.1. Энергетические процессы на электродах и в канале при импульсном пробое в малых промежутках.....	73

4.2. Процессы в столбе разряда	76
4.3. Процессы на аноде	82
4.4. Процессы на катоде	86
4.5. Тепловые процессы на поверхности электродов при электроискровой обработке материалов	88
4.6. Гидродинамические процессы в межэлектродном промежутке	95
4.7. Задача о расширении и схлопывании газового пузыря	97
ГЛАВА 5. МЕХАНИЗМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭРОЗИИ МЕТАЛЛОВ В ЖИДКОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СРЕДЕ.....	101
5.1. Данные скоростной рентгеноимпульсной съемки	104
5.2. Модель механизма электрической эрозии в импульсном разряде	107
5.3. Характеристики электроэрозионного способа обработки материалов	109
5.4. Электротехнологические характеристики обработки.....	114
5.5. Выбор материала электрода-инструмента	121
ГЛАВА 6. ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУЕЙ.....	125
6.1. Плазма и ее некоторые свойства	126
6.2. Получение дуговой плазмы	128
6.3. Факторы, влияющие на энергетические характеристики плазменной струи	133
6.4. Области применения плазменных технологий.....	136
ГЛАВА 7. ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ.....	157
7.1. Взаимодействие лазерного излучения с веществом.....	157
7.2. Лазерная резка металлов.....	159
7.3. Лазерная сварка	162

7.4. Основные закономерности лазерного упрочнения сталей	165
7.5. Размерная обработка	167
7.6. Применение лазеров в медицине	169
7.7. Лазерный отжиг	175
ГЛАВА 8. ЭЛЕКТРОВЗРЫВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ	178
8.1. Электрический взрыв проводников.....	178
8.2. Физические основы получения ультрадисперсных порошков с помощью электрического взрыва проводника.....	181
8.3. Свойства ультрадисперсных порошков	183
8.4. Область применения ультрадисперсных порошков.	185
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	186
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	189

Учебное издание

Жидков Иван Сергеевич
Кухаренко Андрей Игоревич
Чолах Сеиф Османович

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Редактор Н. П. Кубыщенко
Верстка Е. В. Ровнушкиной

Подписано в печать 16.05.2019. Формат 60×84 1/16.
Бумага писчая. Цифровая печать. Усл. печ. л. 11,4.
Уч.-изд. л. 9,0. Тираж 40 экз. Заказ 164.

Издательство Уральского университета
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
Тел.: 8 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ
620083, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: 8 (343) 358-93-06, 350-58-20, 350-90-13
Факс: 8 (343) 358-93-06
<http://print.urfu.ru>

Для заметок

